



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

원자력 발전소 폴라 크레인의 내진설계에
관한 연구

**A Study for Seismic Design of Polar Crane in Nuclear Power
Plant**

지도교수 조 종 래



2009년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과 류 정 형

本 論文을 류정형의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 공학박사 왕 지 석 (인)

위 원 공학박사 최 형 식 (인)

위 원 공학박사 조 종 래 (인)



2008년 12월 30일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 내용	2
2. 내진평가를 위한 유한요소 해석의 이론적 배경	4
2.1 모드 해석 이론	4
2.2 응답 스펙트럼 해석 이론	8
3. 폴라 크레인의 유한요소 모델	10
3.1 해석 및 설계절차	10
3.2 유한요소 모델링	11
3.2 해석 조건	18
4. 폴라 크레인의 구조 및 내진평가	22
4.1 허용 응력 및 변위	22
4.2 구조 해석	23
4.3 고유치 해석	29
4.3.1 고유진동수 분석	29
4.3.2 유효질량 분석	43

4.4 응답 스펙트럼 해석	47
4.4.1 응답 스펙트럼	47
4.4.2 응답 스펙트럼 해석 결과 분석	53
5. 결론	59
참고문헌	60



A Study for Seismic Design of Polar Crane in Nuclear Power Plant

Jung-Hyung Ryu

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,
Korea Maritime University

Abstract

The Polar Crane (PC) consists of two structural parts of bridge and trolley. The bridge structure is approximately 43 m long and 9 m wide and is primarily composed of one 36.8m deep wire rope area at the operating level. A trolley structure is mounted on wheels that roll on the rails of the containment building.

The analysis uses the seismic response curves (OBE, SSE) for plant that were reflected the revision to the seismic requirement of nuclear power plant. New curves contain higher amplitude than those of previous nuclear power plants in Korea. The structure was modeled using finite element techniques. Calculated stresses from finite element model are evaluated in accordance with design criteria of KEPIC MCN, 2000.

The objective of this paper is to evaluate the integrity of polar crane due to normal and earthquake loading, and to reduce the reaction force on the support. The response spectrum analysis is the most common technique used to determine the maximum structural response due to earthquake loading.

The analysis assumes that, for the seismic loading in the horizontal direction perpendicular to the crane girder (the lateral direction), slip of the end trucks along the runway rails occurs. The responses, for this condition, are conservatively combined with those due to vertical and longitudinal seismic loading.

It is shown that the crane is adequate to resist loads up to the Maximum Critical Load (MCL) under response to the Safe Shutdown Earthquake(SSE) loading given in the KEPCO. The seismic qualification has been carried out in accordance with KEPCO specification for the Nuclear Power Plant, containment polar crane.

The containment polar crane is classified as seismic category II equipment. It is required that the crane shall be capable of holding the loads upto the maximum critical load under response to an SSE loading without exceeding the allowable stresses for the crane materials to maintain its structural integrity during and after an SSE loading.

The reaction forces that transferred from crane support(wheel) to the rail are important loading data to design the containment building, because the rail of polar crane is located on the top of containment building. The method to reduce the reaction forces is proposed.

List of Tables

Table 1	Analysis cases
Table 2	Material properties
Table 3	Real constant of MASS21
Table 4	Real constant of BEAM188
Table 5	Boundary condition
Table 6	Allowable stress
Table 7	Deflection criteria
Table 8	Stiffness of support
Table 9	Maximum stress
Table 10	Maximum reaction force of SSE condition
Table 11	Spring element number
Table 12	Modal frequencies for Case A
Table 13	Modal frequencies for Case B
Table 14	Modal frequencies for Case C
Table 15	Effective mass in the horizontal-direction
Table 16	Effective mass in the vertical-direction
Table 17	Sum of effective masses
Table 18	North-South direction reference response spectra
Table 19	Vertical direction reference response spectra
Table 20	Maximum stress
Table 21	Maximum displacement



List of Figures

- Fig. 1 Analysis process
- Fig. 2 Component arrangement
- Fig. 3 Component of polar crane (Case A)
- Fig. 4 Mesh shape for Case A
- Fig. 5 Mesh shape for Case B
- Fig. 6 Mesh shape for Case C
- Fig. 7 Element geometry
- Fig. 8 Position of boundary condition
- Fig. 9 Component arrangement of support
- Fig. 10 Element number generating spring element in Polar crane
- Fig. 11 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 1 in girder
- Fig. 12 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 1 in trolley
- Fig. 13 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 2 in girder
- Fig. 14 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 2 in trolley
- Fig. 15 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 1 in girder
- Fig. 16 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 1 in trolley
- Fig. 17 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 2 in girder
- Fig. 18 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 2 in trolley
- Fig. 19 1st mode shape of 2.637 Hz for Case A
- Fig. 20 2nd mode shape of 2.855 Hz for Case A
- Fig. 21 3rd mode shape of 4.803 Hz for Case A

Fig. 22 4th mode shape of 7.148 Hz for Case A

Fig. 23 5th mode shape of 7.184 Hz for Case A

Fig. 24 6th mode shape of 8.071 Hz for Case A

Fig. 25 1st mode shape of 1.685 Hz for Case B

Fig. 26 2nd mode shape of 2.637 Hz for Case B

Fig. 27 3rd mode shape at 4.588 Hz for Case B

Fig. 28 4th mode shape at 4.879 Hz for Case B

Fig. 29 5th mode shape at 7.177 Hz for Case B

Fig. 30 6th mode shape at 7.212 Hz for Case B

Fig. 31 1st mode shape at 2.637 Hz for Case C

Fig. 32 2nd mode shape at 4.163 Hz for Case C

Fig. 33 3rd mode shape at 4.828 Hz for Case C

Fig. 34 4th mode shape at 7.177 Hz for Case C

Fig. 35 5th mode shape at 7.208 Hz for Case C

Fig. 36 6th mode shape at 8.594 Hz for Case C

Fig. 37 Effective masses in horizontal direction

Fig. 38 Effective masses in vertical direction

Fig. 39 North-South direction reference response spectra

Fig. 40 Vertical direction reference response spectra

Fig. 41 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A in bridge

Fig. 42 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A in trolley

Fig. 43 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B in bridge

Fig. 44 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B in trolley

Fig. 45 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case C in bridge

Fig. 46 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case C in trolley

Fig. 47 Distribution of displacement on SSE condition for Case A

Fig. 48 Distribution of displacement on SSE condition for Case B

Fig. 49 Distribution of displacement on SSE condition for Case C



1. 서론

1.1 연구 배경

지구 내부에는 많은 에너지가 보존되어 있으며, 대륙이 팽창하면 지표부에도 변화가 일어난다. 지진(earth quake)은 그 변화 중의 하나이며, 지각내 또는 맨틀 상부에 급격한 변동이 일어나고, 짧은 시간에 에너지가 방출되어서 지상에 급격한 진동이 일어나는 현상이다⁽¹⁾. 지진의 경우 직접적인 지진파에 의한 피해도 막대하지만, 지진 발생 이후에 뒤따르는 연쇄 과정에 의한 피해가 더욱 심각할 수 있다. 예를 들면 지진 발생 지역의 수많은 발화원에서 동시 다발적으로 발생한 화재로 인하여 화학공장, 석유저장소, 원자력발전소 등에서의 대규모 폭발이나 위험물의 유출로 인한 피해가 발생할 수도 있다. 해저에서 발생한 지진의 경우 해일 등에 의한 피해가 발생할 수도 있다. 따라서 지진이 발생할 때 피해의 규모를 줄이기 위해서 구조물이나 기기들의 지진에 대한 안전성 확보가 필요하다.

국내에서 최초로 지진계를 설치하고 지진을 관측한 것은 1905년으로 역사가 100년 남짓하다. 그래서 국내에서 발생한 지진은 1905년 이전의 역사 지진과 이후의 계기 지진으로 나눌 수 있고, 역사 지진의 경우 고문헌 등에서 그 기록을 찾을 수 있다. 한반도에서는 서기 2년부터 1981년까지 2366개의 지진이 발생하였다. 한반도는 지진이 빈번하게 발생하는 일본이 인접해 있지만 지진에 대해서 일반적으로 안전 지역으로 받아들여지고 있다. 하지만 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진(규모 4.8)과 최근 국내외에서 발생한 일련의 큰 지진으로 인하여 내진설계의 필요성과 지진피해에 대한 경각심이 크게 고조되고 있다⁽²⁾.

지진에 대한 안전성 확보가 반드시 요구되는 시설 중의 하나인 원자력발전소는 원자로 내의 막대한 방사능과 에너지가 잠재적인 위험성을 안고 있어서

지진에 의한 사고 발생시 심각한 환경오염과 수많은 인명피해를 가져 올 수 있기 때문에 원자력발전소에서 작동되는 기기는 엄격한 내진 설계가 필요하며, 사고 조건하에서 정상적으로 작동할 수 있도록 설계되어야 한다. 원자력발전소에 사용되는 제어설비 또는 모니터링 시스템 등에 관련한 제반 설비의 주요 부품 및 기기는 성능에 영향을 미칠 수 있는 자연현상, 가상사고 등의 환경조건에서 고유의 안전 기능을 수행할 수 있음을 입증하는 기기검증(equipment qualification)이라는 절차가 설계 및 제작단계에서 요구된다. 기기검증의 영역으로는 내환경 기기검증, 내지진 기기검증, 내전자와 기기검증이 있으며, 본 연구에서 다루고자 하는 내지진 기기검증은 내진 해석(seismic analysis)과 내진 시험(seismic test)의 두 가지 방법으로 구분할 수 있다⁽³⁾. 특히 원자력 발전소의 기기는 ASME코드⁽⁴⁾에 의해서 설계, 제작, 검증을 엄격히 규제하고 있다.

1.2 연구 목적 및 내용

일반적인 구조물의 내진 설계를 위한 동적 해석은 국내에서도 국외에 못지 않은 경험과 기술을 보유하고 있다. 본 연구에서는 원자력발전소의 폴라 크레인의 유한요소 해석을 통해 내진 안전성을 검증하고자 한다.

본 논문의 목적은 운전하중과 지진하중에 대한 폴라크레인의 건전성을 평가하는 방법을 제시하고 표준화하여 설계프로젝트에 유용하게 활용할 수 있도록 하는 것이다. 또한 내진해석의 결과로 구하는 크레인의 지지부의 반력은 원자력발전소 차폐건물(containment building)의 구조설계 데이터로 주어지기 때문에 반력이 최소화되도록 크레인의 구조를 최적화하는 하는 것이다⁽⁵⁾.

유한요소 해석을 위해 ANSYS 11.0의 자체 모델러를 이용하여 빔요소와 스프링요소로 이루어진 유한요소 모델을 완성하였다. 이를 이용하여 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 고려한 운전조건(operating condition)과

안전정지지진(SSE : safe shutdown earthquake) 하중을 고려한 SSE 조건에 대한 유한요소 해석을 수행하였다.

SSE 조건에서는 모드 해석(modal analysis)을 수행하여 동적 특성을 파악하고, 설계 규격으로 제시된 요구 응답 스펙트럼(required response spectrum)을 이용한 응답 스펙트럼 해석(response spectrum analysis)을 수행하여 폴라 크레인의 안전성을 평가하였다.



2. 내진평가를 위한 유한요소 해석의 이론적 배경

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(finite element)로 나누어서 각 절점의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분원리(variational principle), 가중잔여법(method of weighted residual), 에너지 균형법(energy balance approach)등을 이용하여 세우고 이 미분방정식을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다. 유한요소법을 활용한 내진평가를 위해 모드해석과 스펙트럼해석이 이루어져야 한다.

2.1 모드 해석 이론

외부로부터 외력 벡터 $\{F(t)\}$ 를 바든 다 자유도 시스템(multi degree of freedom system)의 운동방정식은 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2.1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬(mass matrix), 감쇠행렬(damping matrix), 강성행렬(stiffness matrix)을 나타내고, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$, $\{F(t)\}$ 는 각각 절점의 가속도, 속도, 변위, 작용 하중 벡터를 나타낸다. 모드 해석을 위하여 식 (2.1)에서 감쇠행렬과 외력 벡터를 제외한 자유진동 시스템으로 나타내면 식 (2.2)를 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (2.2)$$

변위 벡터 $\{x(t)\}$ 는 위치와 시간의 함수로서, 이 변위 벡터를 공간적인 형상 벡터 $\{\Phi\}$ 와 시간적인 변화함수 $q(t)$ 의 곱으로 정의한다. 그리고 $q(t)$ 를 조화함수로 나타내면 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있고, 이 식을 (2.2)에 대입하면 식 (2.4)를 유도할 수 있다.

$$\{x(t)\} = \{\Phi\}q(t) = \{\Phi\}\sin\omega t \quad (2.3)$$

$$(-w^2[M] + [K])\{\Phi\} = \{0\} \quad (2.4)$$

식 (2.4)에서 모드 형상 벡터인 $\{\Phi\}$ 가 0이 아닌 벡터가 되기 위해서는 고유치(eigenvalue)를 얻기 위한 특성방정식(characteristic equation) 식 (2.5)를 만족해야 한다.

$$\det(-w^2[M] + [K]) = 0 \quad (2.5)$$

식 (2.5)를 풀면 자유도 n 개의 서로 다른 w 를 구할 수 있고, 크기가 작은 것부터 정리하여 $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 로 나타내고, 이를 고유진동수(natural frequency)라 정의한다. 그리고 w_i 에 대응하는 형상 벡터를 $\{\Phi\}_i$ 로 나타내고, 이 n 개의 형상 벡터들을 식 (2.6)과 같이 행렬로 표기하여 자유진동 모드행렬 $[\Phi]$ 라 한다.

$$[\Phi] = [\{\Phi\}_1, \{\Phi\}_2, \dots, \{\Phi\}_n] \quad (2.6)$$

다음으로 모드 기여도(mode participation factor)와 유효 질량(effective mass)을 정의하였다. 지반 변위를 $x_g(t)$ 라 하고 지반 변위에 대한 구조물의 상대 변위를 $x(t)$ 라 할 때 구조물의 절대 변위 $x_t(t)$ 는 $x_t(t) = x_g(t) + x(t)$ 이다.

식 (2.2)를 절대 변위 $x_t(t)$ 의 항으로 정리하면 식 (2.7)과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}_t(t)\} + [K](\{x_t(t)\} - \{x_g(t)\}) = \{0\} \quad (2.7)$$

그리고 식 (2.7)을 상대 변위 $x(t)$ 에 관한 식으로 표현하면 식 (2.8)로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.8)$$

여기서 변위 벡터 $\{x(t)\}$ 를 식 (2.9)와 같이 자유진동 모드행렬과 각각의 모드에 대응하는 시간변화 함수 벡터 $\{q(t)\}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{q(t)\} \quad (2.9)$$

식 (2.9)를 식 (2.8)에 대입하고 양변에 $[\Phi]^T$ 를 선승하면, 자유진동 모드행렬의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성(orthogonality)때문에 식 (2.10)과 같이 각 모드좌표계에 대하여 비연성된 방정식을 얻을 수 있고, 식 (2.10)의 우변을 식 (2.11)과 같이 모드 기여도 벡터 $\{\mathcal{L}\}$ 로 정의할 수 있다.

$$[\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{q}(t)\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{q(t)\} = -[\Phi]^T[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.10)$$

$$\{\mathcal{L}\} \equiv [\Phi]^T[M]\{1\} \quad (2.11)$$

여기서 $\{\mathcal{L}\}$ 의 i 번째 요소 \mathcal{L}_i 를 i 번째 진동 모드에 대한 기여도라 부르고, 유효 질량(Me)은 i 번째 모드 벡터 $\{\Phi\}_i$ 를 이용하여 식 (2.12)와 같이 정의된다.

$$Me = \frac{\mathcal{L}_i^2}{\{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i} \quad (2.12)$$

여기서 모드 벡터 $\{\Phi\}_i$ 가 질량행렬에 대하여 정규화된 벡터(normalized vector)이면, $\{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$ 는 1이기 때문에 유효 질량은 모드 기여도의 제곱으로 표현되고 유효 질량을 모두 합하면 구조물의 전체 질량이 된다. 모드 기여도와 유효 질량은 구조물의 모드들이 구조물의 동특성에 미치는 영향 정도를 알 수 있는 인자가 된다.



2.2 응답 스펙트럼 해석 이론

지진과 같은 동적하중에 의한 구조물의 동적거동은 구조물의 고유진동주기와 감쇠비 등의 동적특성에 따라서 크게 달라진다. 지진하중이 가해지는 동안 구조물에 발생하는 변위, 속도, 가속도 밀면전단력, 전도모멘트 등의 응답은 시간이력 해석법(time history analysis)에 의하여 결정될 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하여 구조물의 지진거동을 알아내는 것은 상당히 번거로울 뿐만 아니라 내진설계를 위하여 합당한 입력 지반운동을 적절히 채택하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 강진지역에서는 실제 내진설계에서 여러 가지의 지반운동에 대하여 시간이력해석법에 의한 구조물의 거동을 해석하고 설계에 반영한다⁽⁷⁾.

일반적으로 지진 발생시 시간에 대해 불규칙적인 하중이 대상 구조물에 가해진다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 시간영역에서 구조물의 과도응답을 구해야 한다. 그러나 과도응답을 구하기 위해서는 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 간단하면서도 비교적 정확한 답을 구할 수 있는 응답 스펙트럼 해석 방법이 많이 사용되고 관련 이론은 다음과 같다⁽⁸⁾.

식 (2.8)에 감쇠항을 고려하면 식 (2.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.13)$$

그리고 제 2.1절과 같은 절차에 의하여 식 (2.14)와 같은 비연성된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mathcal{L}_i \ddot{x}_g(t) \quad (2.14)$$

여기서 $\mu_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$, $2\mu_i \xi w_i = \{\Phi\}_i^T [C] \{\Phi\}_i$, $\mu_i w_i^2 = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$, $\mathcal{L}_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{1\}$ 로 정의하고, 식 (2.14)를 식 (2.15)와 같은 형태로 변형하면

최대값 $q_{i,\max}$ 는 식 (2.16)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mu_i \ddot{x}_g(t) \left(\frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} \right) \quad (2.15)$$

$$q_{i,\max} = \max |q_i(t)| = \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (2.16)$$

여기서 S_d 는 고유진동수 w_i 와 모드 감쇠비 ξ_i 를 갖는 1 자유도계에서 입력 스펙트럼으로부터 구해진 최대 변위로 스펙트럴 변위(spectral displacement)이고, i 번째 모드에 관련된 구조물의 최대 변위 $\{x\}_{i,\max}$ 는 식 (2.17)과 같이 구할 수 있다.

$$\{x\}_{i,\max} = \{\Phi\}_i q_{i,\max} = \{\Phi\}_i \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (2.17)$$

위에서 구한 각 모드의 최대값을 조합하기 위해서 보통 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 방법을 가장 많이 사용하며, SRSS 방법을 사용한 전체 응답 R_u 는 총 n 개의 모드를 추출할 때 다음과 같다.

$$R_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\{x\}_{i,\max})^2} \quad (2.18)$$

3. 폴라 크레인의 유한요소 모델

3.1 해석 및 설계절차

폴라 크레인의(이하 PC)의 내진해석을 위한 해석 및 설계절차는 크게 형상 입력, 재질 및 경계조건 입력, 구조해석, 고유진동수 해석, 스펙트럼 해석 그리고 결과 출력으로 나눌 수 있다.

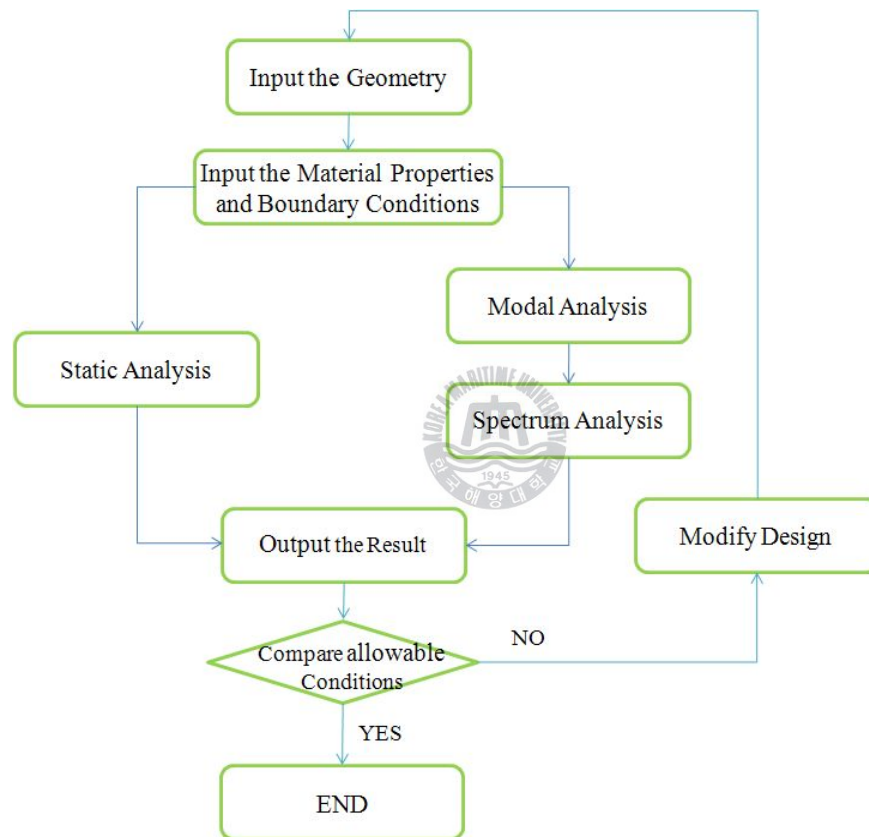


Fig. 1 Analysis process

형상입력 단계에서는 FEM해석을 수행할 유한요소모델의 형상을 입력하는 작업을 수행하며, 재질 및 경계조건 입력 단계에서는 유한요소모델의 각 부분

에 재질 및 경계조건을 부여한다. 완성된 유한요소모델과 해석 조건하에서 고정하중(dead load)와 활하중(live load)을 고려한 구조해석을 수행하고, 내진 평가를 위해 고유진동수 해석과 스펙트럼 해석을 수행한다. 고유진동수 해석에서는 스펙트럼 해석에 사용될 유한요소모델의 모드를 계산하며, 스펙트럼 해석에서는 고유진동수 해석을 통해 얻은 모드와 응답스펙트럼의 가속도 값을 이용하여 내진 해석을 수행한다. 이러한 해석을 통해 결과를 출력하고 내진안정성을 평가한다.

3.2 유한요소 모델링

원자력 발전소의 폴라 크레인의 내진해석을 위해 유한요소 모델링을 수행하였다. 실제형상은 Fig. 2와 같이 2차원 도면으로 나타내었다. 폴라크레인은 크게 브릿지, 트롤리, 서포트 그리고 주행로로 구성되어 있다.

본 연구에서는 해석프로그램으로 상용코드인 ANSYS 11.0⁽⁹⁾을 사용하여 Fig. 3과 같은 형태로 모델을 단순화 하여 나타내었다. 유한요소 모델은 크레인의 운전상황을 고려한 모델에 대한 유한요소 모델을 완성하여 Fig. 4 ~ 6에 나타내었다. 크레인의 각 Case 별 모델에 대한 설명은 Table 1에 정리하였다. 트롤리가 브릿지 중심에 위치하여 있을때 wire rope가 가장 높을때 MCL, 가장 낮을때 MCL과 wire rope가 가장 높을때 no MCL으로 3가지 Case에 대해서 모델링을 완성하였다.

사용된 요소는 2절점 빔 요소(3-D linear finite strain beam element, BEAM188) 178개, 1절점 스프링 댐핑 요소(spring damper element, COMBIN14) 12개, 1절점 점 요소(structural mass element, MASS21) 14개이며, 절점 204개로 이루어져있다. 사용된 요소의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1 Analysis cases

	Description
Case A	The trolley is at the center of the bridge. The main hoist box in the highest position with MCL
Case B	The trolley is at the center of the bridge. The main hoist box in the lowest position with MCL
Case C	The trolley is at the center of the bridge. The main hoist box in the highest position with no MCL

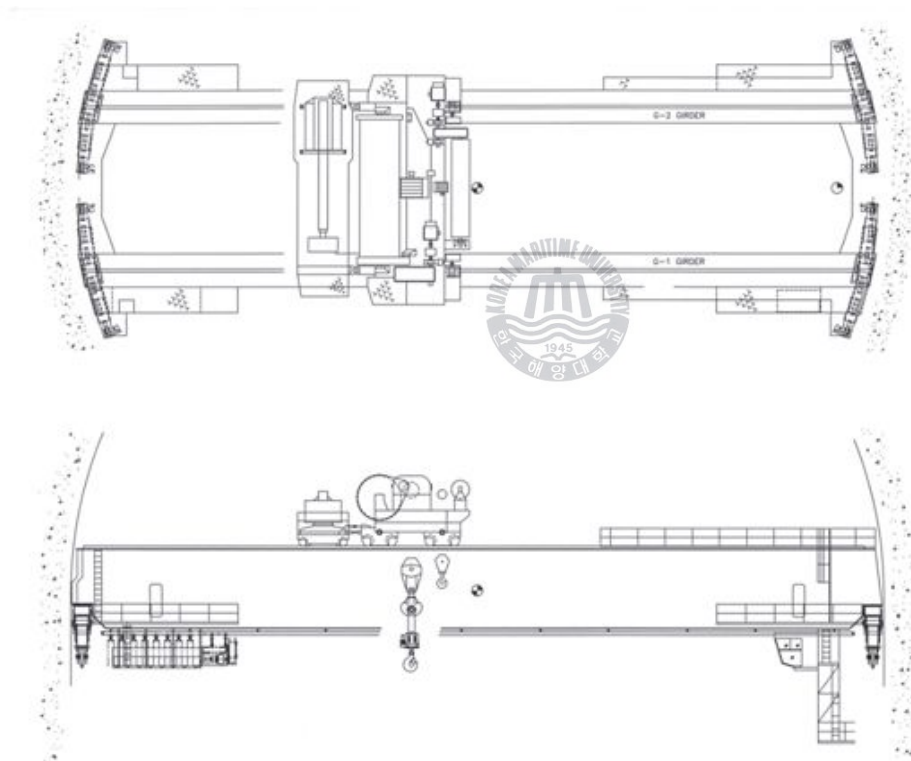


Fig. 2 Component arrangement⁽⁷⁾

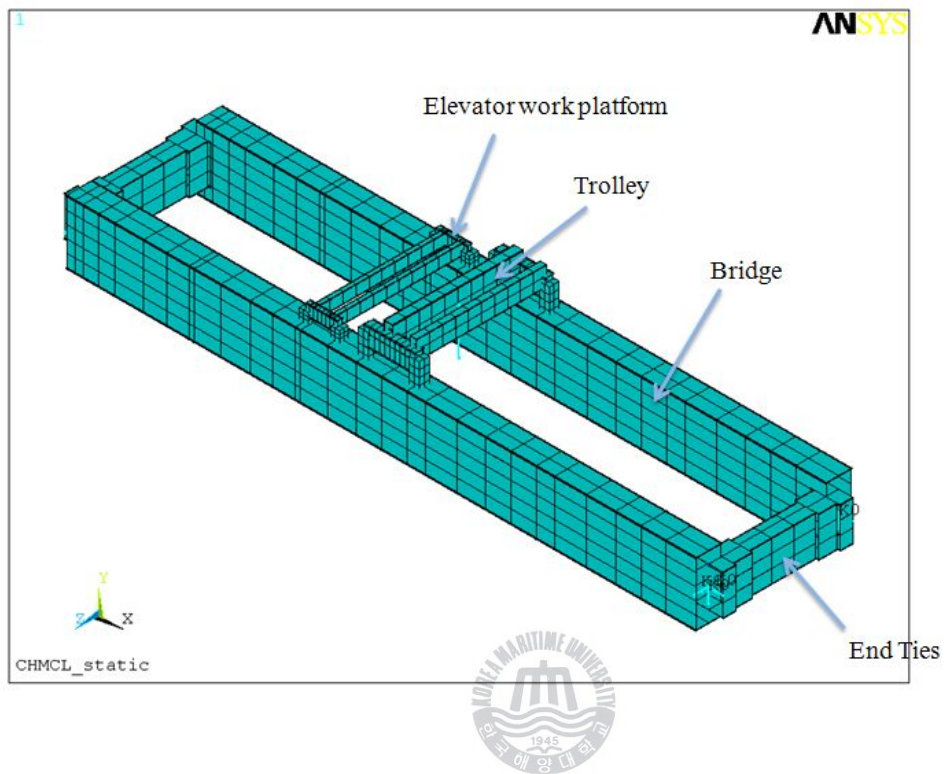


Fig. 3 Component of polar crane (Case A)

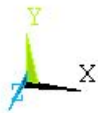
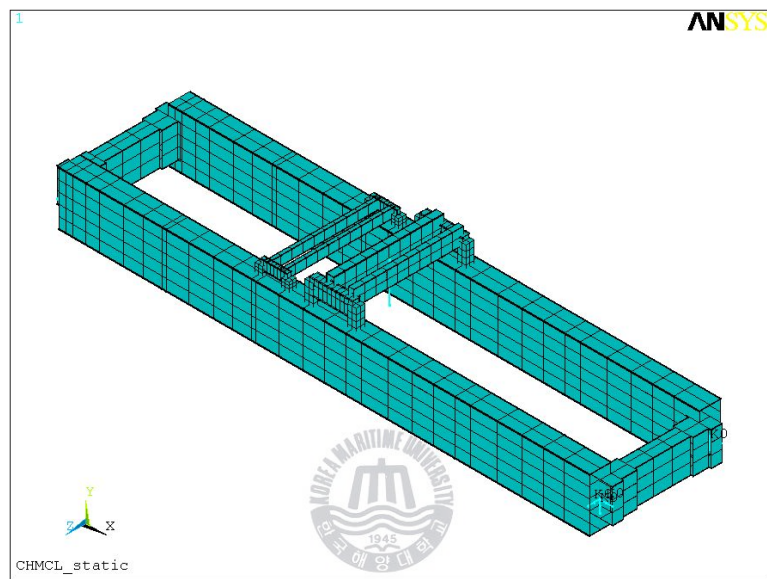


Fig. 4 Mesh shape for Case A

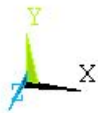
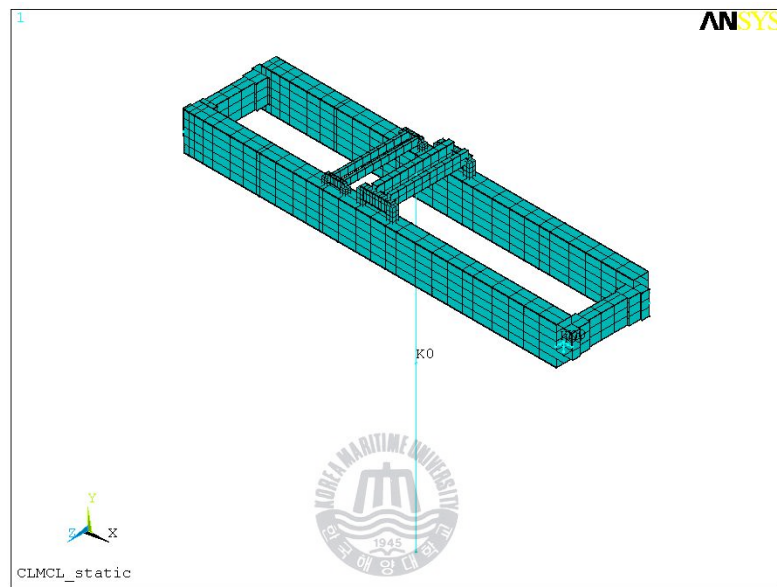


Fig. 5 Mesh shape for Case B

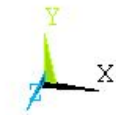
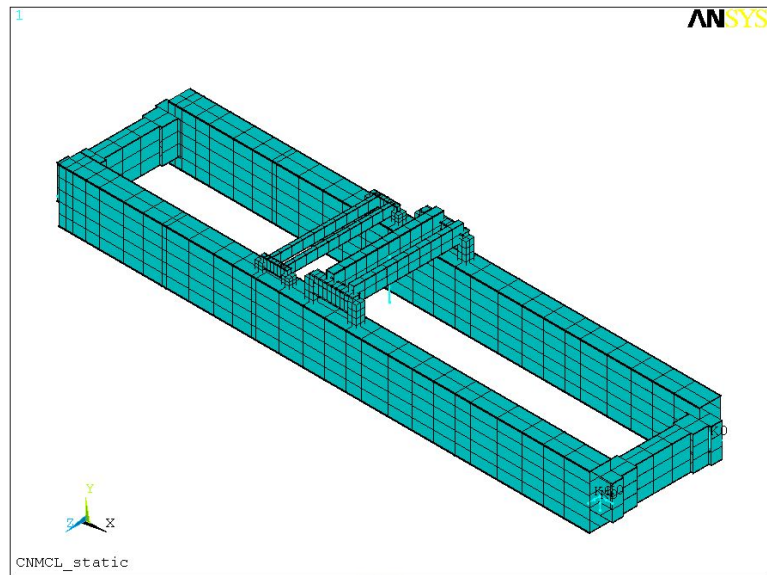
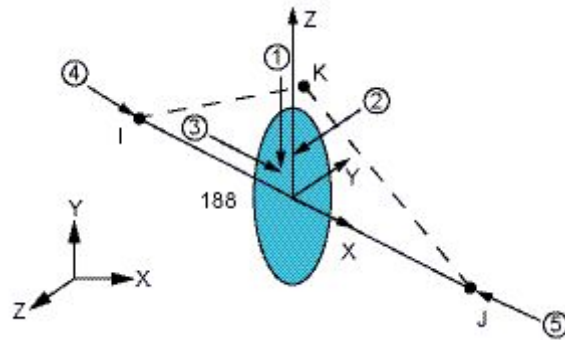
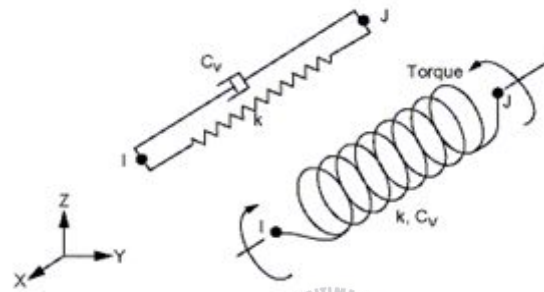


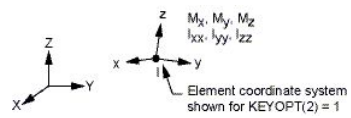
Fig. 6 Mesh shape for Case C



(a) BEAM188



(b) COMBIN14



(c) MASS21

Fig. 7 Element geometry

3.3 해석 조건

폴라크레인은 용접 구조용 강재인 JIS G3106를 사용하였으며, 물성치는 Table 2에 나타내었다. 각 물성치의 밀도는 유한요소 모델링을 통해 간략화되면서 반영되지 않은 질량에 대한 등가 밀도를 적용하였다. 폴라크레인에 설치된 집중된 질량을 가지는 구조물의 경우 1절점 요소인 MASS21을 이용하여 적용하였으며, Table 3에 나타내었다. 또한 폴라크레인의 유한요소모델에 사용된 2절점 요소인 BEAM188의 단면정보는 Table 4에 정리하였다.

Table 2 Material properties

No.	Material	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress, σ_y (MPa)	Equivalent Density (kg/m^3)	Object
1	JIS G3106, SM490YB	206	0.3 ⁽¹⁰⁾	333.4	12300	G-2 girder
2		206	0.3	333.4	14100	G-1 girder
3		206	0.3	362.85	9060	End ties
4		206	0.3	333.4	16700	Rear trolley
5		206	0.3	333.4	34100	Front trolley
6		206	0.3	333.4	25000	trolley girt
7		206	0.3	333.4	7850	platform

Table 3 Real constant of MASS21

No.	Description	Mass (kg)
1	Truck_idle / Tro. dirve(idle) / Main drum / Drum reduction / Accessory	18,359.0
2	Truck_drive / Tro. Drive	3,705.0
3	M. upper block / M. wire rope	12,458.0
4	MCL / PLP / Bottom block	286,455.0
5	Bottom block	11,795.0
6	E.W.P / base frame / Truck / Platform / Seismic restraint / wheel ass'y	5,250.0
7	E.W.P / base frame / Truck / Platform / Seismic restraint	2,750.0
8	Bridge ass'y	32,253.0



Table 4 Real constant of BEAM188

No.	Description	Area(m ²)	I _{yy} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	Remark
1	BEAM	0.354	0.1745	1.126	
2		0.1531	0.1075	0.1785	
3		0.141	0.0679	0.1558	
4		0.1291	0.0382	0.1331	
5		0.083	0.004675	0.01889	
6		0.093	0.00488	0.01907	
7		0.19935	0.12073	0.87098	
8		0.19935	0.12073	0.87098	
9		0.017705	0.0000249	0.0000249	
10		0.03446	0.0005328	0.0029076	
11		0.03446	0.0005328	0.0029076	
12		0.05968	0.022289	0.0048431	

플라크레인의 유한요소 모델이 실제 모델의 움직임과 유사하도록 하면서 고유치 해석 결과에서 강체모드가 발생하지 않도록 MCN 2154.3에 따라 적용하였다. 고유치 해석 결과에서 강체모드가 발생했을 경우 강체모드의 모드기여계수(participation factor)가 나머지 모드들의 모드기여계수보다 상당히 크게 될 수가 있다. 그런데 강체모드의 모드기여계수가 지배적이게 되면 스펙트럼 해석에서 모드 조합을 할 때 지배적인 강체모드로 계산결과에 많은 오차가 발생할 수 있다. 따라서 오차 발생을 적게 하기 위해서는 가능한 강체모드가 나타나지 않도록 경계조건을 적용해야 한다⁽¹¹⁾.

Fig. 8는 플라크레인의 경계조건을 적용한 위치를 나타내고 있으며, Table 5에 각 위치의 경계조건을 정리하였다. 경계조건은 회전운동은 모두 자유롭게 풀어주었고, 실제 거동과 유사한 경계조건을 선택하였다.

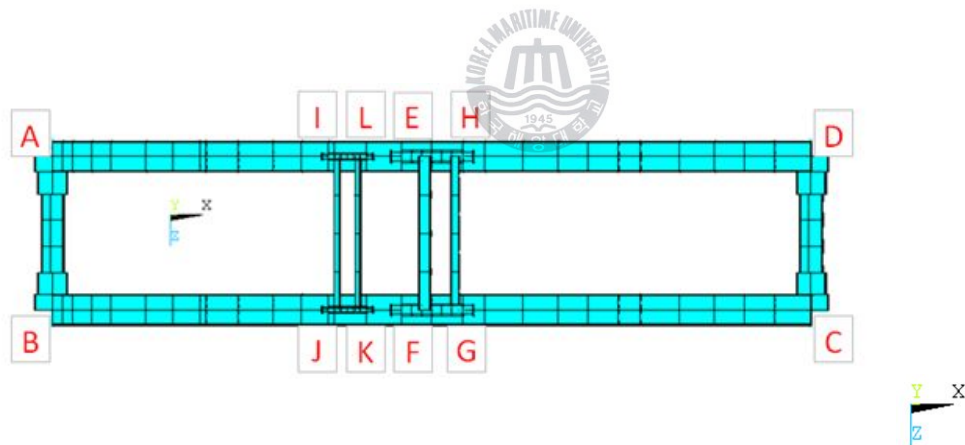


Fig. 8 Position of boundary condition

Table 5 Boundary condition

		UX	UY	UZ	ROT X	ROT Y	ROT Z
Bridge wheels	A	0	1	1	—	—	—
	B	0	1	1	—	—	—
	C	1	1	1	—	—	—
	D	1	1	1	—	—	—
Trolley wheels	E / I	1	1	1	—	—	—
	F / J	1	1	1	—	—	—
	G / K	0	1	1	—	—	—
	H / L	0	1	1	—	—	—

1 : Fixed boundary condition

0 : Free boundary condition



4. 핵연료 취급 장치의 구조 및 내진평가

4.1 허용 응력 및 변위

폴라크레인의에 사용된 재료는 일반 구조용 압연강재인 JIS G3106이며, 항복 강도는 각각 333.4MPa이다. 구조물의 응력상태에 따라 구조물의 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 고려한 운전조건(operating condition)과 안전정지지진(SSE : safe shutdown earthquake) 하중을 고려한 SSE 조건에 대한 허용 응력을 각각 구하여야 한다. 이에 MCN 2311에 따라 아래와 같이 허용 응력을 결정하였으며, Table 6에 각 재료의 허용 응력을 정리하였다. Table 7에는 크레인의 허용 변위를 정리하였다.

Operating condition

허용 인장응력(σ_t) : $0.50\sigma_y$

허용 압축응력(σ_c) : $0.50\sigma_y$

허용 전단응력(σ_v) : $0.40\sigma_y$

SSE condition

허용 인장응력(σ_t) : $0.90\sigma_y$

허용 압축응력(σ_c) : $0.90\sigma_y$

허용 전단응력(σ_v) : $0.50\sigma_y$

Table 6 Allowable Stress

(unit : MPa)

	Operating condition	SSE condition
Material	JIS G3106	JIS G3106
σ_t	166.70	300.06
σ_c	166.70	300.06
σ_v	133.36	166.70

Table 7 Deflection Criteria

Loading	Vertical	Lateral
Normal + SSE	L / 250	L /150

Where, "L" is the span of the girder, 43.586m

4.2 구조 해석

폴라크레인은 서포트 부위의 강성에 따라 활하중(live load)의 운전상황에서 응력 값이 많은 차이를 보이고 있다. 서포트 부위의 강성을 최적화함으로써 크레인의 설계를 최적화할 수 있다. 서포트는 브라켓(bracket), 링가더(ring girder), 보기(bogie) 부위로 표시되며 Fig.9에 나타내었다. 서포트의 3부위의 강성을 계산하여 아래 Table8에 2가지 경우로 나타내었다. 서포트의 강성에 따라 2가지 Case의 구조해석⁽¹²⁾과 스펙트럼 해석⁽¹³⁾결과의 von Mises 응력분포를 Fig.11 ~ 18에 나타내었다. 각 Case에서의 최대 응력 값은 Table 9에 정리하였다. 또한 Table 10에 각 Case에 대한 반력 값을 정리하였다. Fig.10과 Table11은 Table10에 있는 element의 위치를 나타내었다. 운전조건에 대한 구조해석과 스펙트럼해석결과를 분석해 보면 응력 값은 서포트의 강성에 대하여 영향을 거의 받지 않는다. 반력의 경우 서포트의 강성이 높은 Case 1이 강성이 낮은 Case 2보다 Horizontal방향에서 매우 낮은 반력이 발생하고 있다.

이는 원자력발전소 차폐건물(containment building)내에서 가장 높은 곳에 위치하는 폴라 크레인의 경우에는 반력이 낮게 나올수록 차폐벽 외벽의 두께를 줄일수 있다. 서포트의 강성이 높을수록 크레인의 안정성을 확보 할 수 있는 최적화 설계가 가능하게 된다. 크레인의 최적화 설계를 위하여 서포트의 강성이 큰 Case 1에 대하여 고유치 해석과 스펙트럼 해석을 수행하였다.

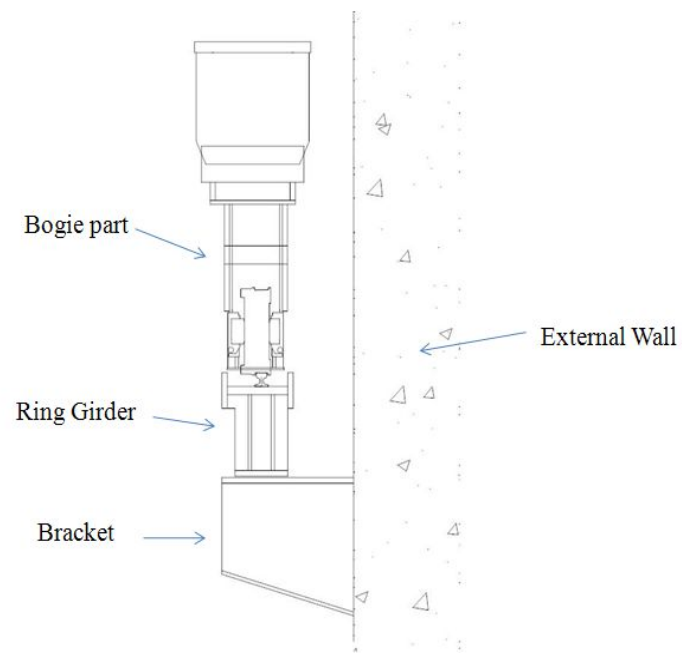


Fig. 9 Component arrangement of support

Table 8 Stiffness of support

(unit : N/m)

	Case 1	Case 2
Horizontal	8.65E8	3.44E8
Vertical	1.512E9	1.04E9
Lateral	4.48E9	1.31E9

Table 9 Maximum stress

(unit : MPa)

			Maximum von Mises stress	Reference figure	Remark
Case 1	Operating	Girder	64.7	Fig. 11	
		Trolley	68.7	Fig. 12	
	SSE	Girder	96.0	Fig. 15	
		Trolley	137.0	Fig. 16	
Case 2	Operating	Girder	64.7	Fig. 13	
		Trolley	68.7	Fig. 14	
	SSE	Girder	101.0	Fig. 17	
		Trolley	138.0	Fig. 18	

Table 10 Maximum reaction force of SSE condition

(unit : kN)

Element	Case 1			Case 2		
	Horizontal	Vertical	Lateral	Horizontal	Vertical	Lateral
233	5146.6			14213.0		
228	6055.1			15345.0		
226		2590.5			2720.6	
224		2739.9			2845.3	
231		2538.9			2615.3	
230		2699.1			2789.1	
227			146.1			165.4
225			142.9			148.5
232			235.1			131.6
229			292.5			123.3

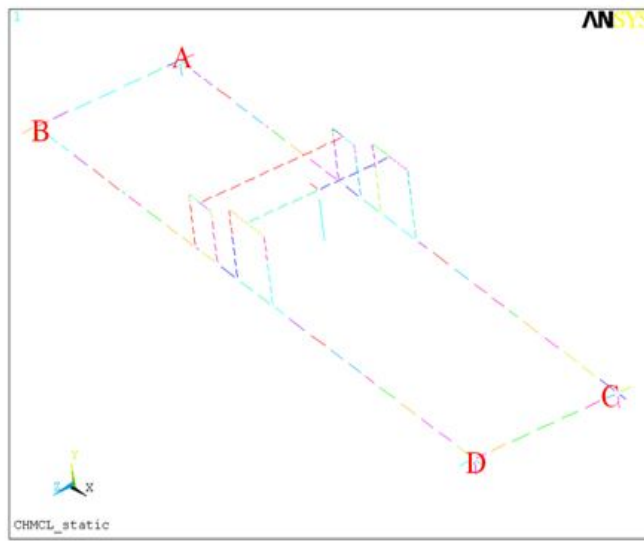


Fig. 10 Element number generating Spring element in Polar crane

Table 11 Spring element number

	Horizontal - X	Vertical - Y	Lateral - Z	Remark
A		226	227	
B		224	225	
C	233	231	232	
D	228	230	229	

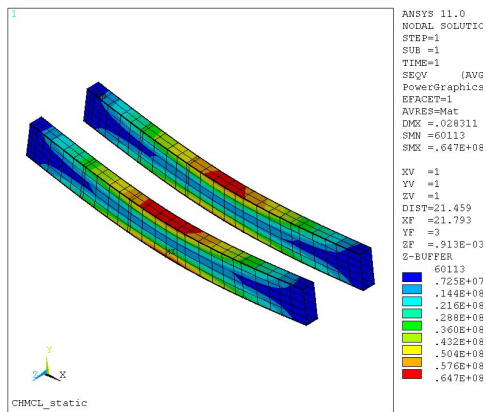


Fig. 11 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 1 in Girder

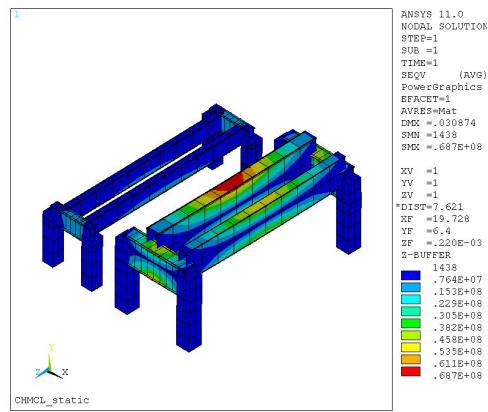


Fig. 12 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 1 in Trolley

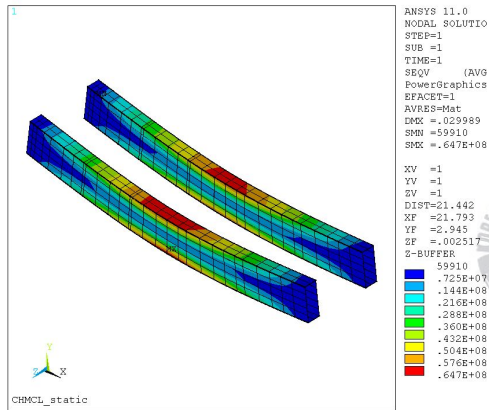


Fig. 13 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 2 in Girder

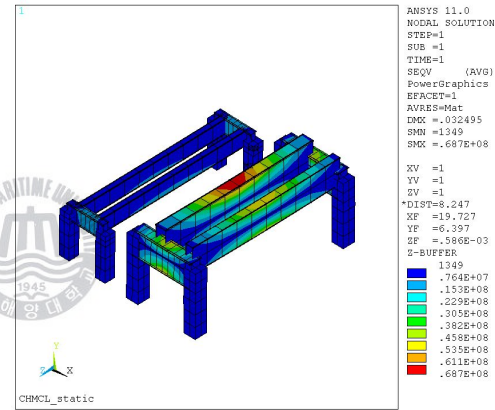


Fig. 14 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case 2 in Trolley

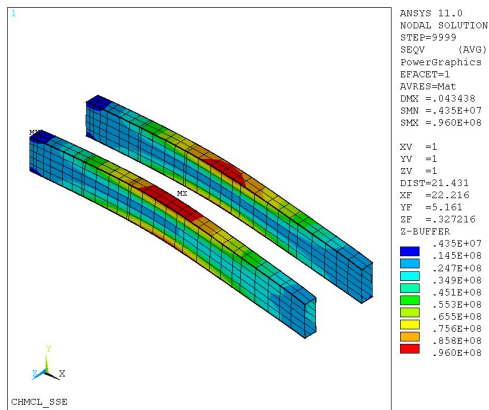


Fig. 15 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 1 in Girder

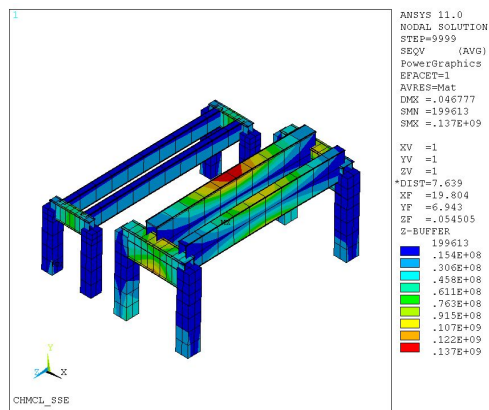


Fig. 16 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 1 in Trolley

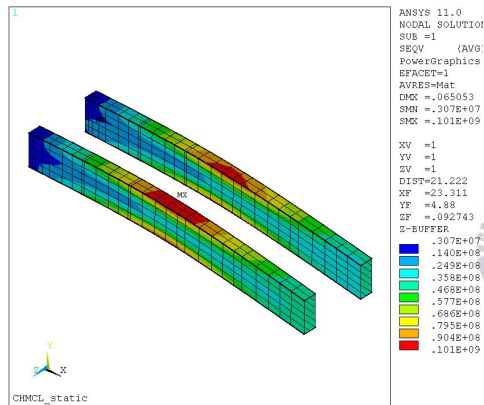


Fig. 17 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 2 in Girder

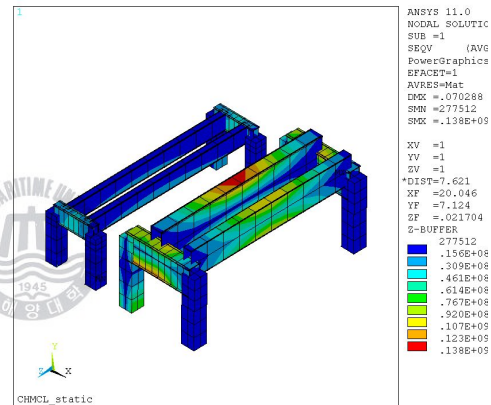


Fig. 18 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case 2 in Trolley

4.3 고유치 해석

내진해석을 수행할 때에 고려되어야 할 모드를 계산하기 위해서 우선 고유치 해석을 수행하였다. 동적거동에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 구조물의 진동수와 진동모드형상(mode shape)이다. 특히 모드형상이 가지는 물리적 의미를 제대로 파악하는 것은 구조물의 지진해석 이론을 이해하고 지진거동을 분석하기 위하여 꼭 필요한 일이다. 다자유도 구조물은 자유도의 수와 같은 모드를 가지며 각각의 모드에는 고유한 진동수가 존재하는데 구조물이 선형거동을 하는 경우에는 먼저 구조물의 동적거동을 각각의 모드별 성분으로 분리하여 구하고 이것을 중첩하는 방법이 매우 유용하다.

4.3.1 고유진동수 분석

내진해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 모드 수를 고려하게 되는데 그 이유는 내진해석을 수행할 때 수 계산에 의하지 않고 모드계수가 기준 값 이상이 되는 모드들에 대해서 모드조합이 이루어지도록 할 수 있게 하기 위함이다. 그런데 복잡한 구조물에 대한 고유치 해석 결과들은 구조물의 국부모드(local mode)까지 포함하고 있으며 이들 국부모드의 모드계수는 기준 값 이하가 되는 경우, 즉 모드 기여계수가 낮은 경우가 많으므로 국부모드들은 모드조합에서 제외되어야 한다. 따라서 조합되는 모드들의 수가 작을 경우에는 조합된 모드들의 전체 모드 기여계수가 크지 않게 되므로 내진해석을 통하여 얻어진 부재에 대한 응력이나 변위와 같은 해석 결과들의 정확성을 확보할 수 없게 된다. 따라서 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드계수가 기준 값 이하가 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 조합에 대해서는 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려 할 필요가 있다. 여기서, 모드계수(mode coefficient)는 고유치 해석을 통해 얻어진 모드

들 중 최대 모드 기여계수로 각 모드들의 모드 기여계수를 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서는 모드계수를 0.01로 설정했으며 이것은 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 1% 크기의 모드기여계수 값을 갖는 모드들에 한해서 모드 조합을 수행한다는 뜻이다.

고유치 해석은 ANSYS 11.0을 이용하여 수행하였고, 해석기법으로는 Block Lanczos법을 사용하였다. 총 100개의 모드의 고유치 해석을 수행하였으며, 각 케이스에 해당하는 해석 결과를 Table 12 ~ 14에 나타내었다. 또한 Case A의 모드 기여도가 높은 6차의 주요 진동 모드형상을 Fig. 19 ~ 24에 보여주고 있다. Case B의 경우 Fig.25~30, Case C의 경우 Fig.31~36에 나타나 있다.



Table 12 Modal frequencies for Case A

(unit : Hz)

Mode sequence number	Modal frequencies	Mode sequence number	Modal frequencies
1	2.6	26	31.1
2	2.9	27	31.9
3	4.8	28	34.9
4	7.1	29	35.0
5	7.2	30	36.9
6	8.1	31	37.2
7	8.6	32	37.4
8	10.2	33	39.6
9	10.3	34	40.6
10	11.0	35	41.3
11	16.2	36	42.1
12	16.5	37	42.8
13	17.1	38	43.5
14	18.1	39	44.9
15	20.4	40	46.1
16	21.7	41	46.7
17	22.1	42	48.7
18	24.7	43	49.8
19	25.9	44	50.0
20	26.7	45	50.5
21	27.5	46	52.2
22	28.5	47	54.1
23	28.7	48	55.7
24	29.5	49	56.4
25	30.3	50	58.7

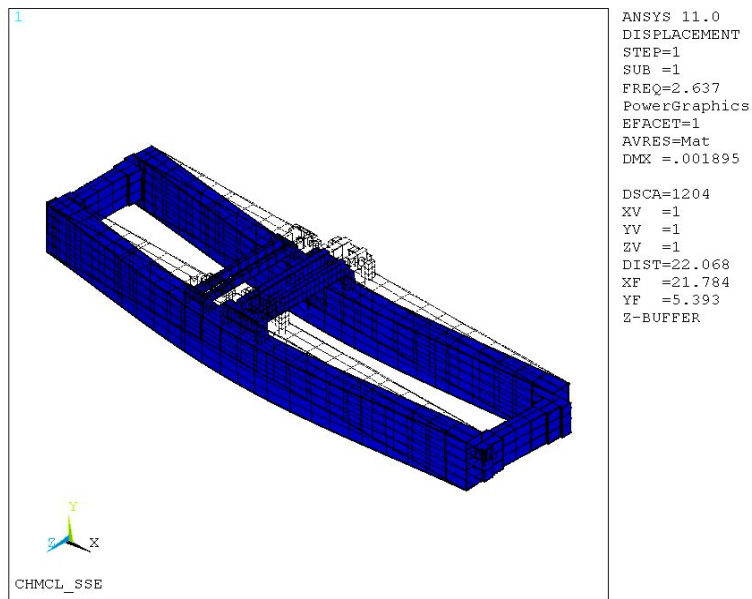


Fig. 19 1st mode shape at 2.637 Hz for Case A

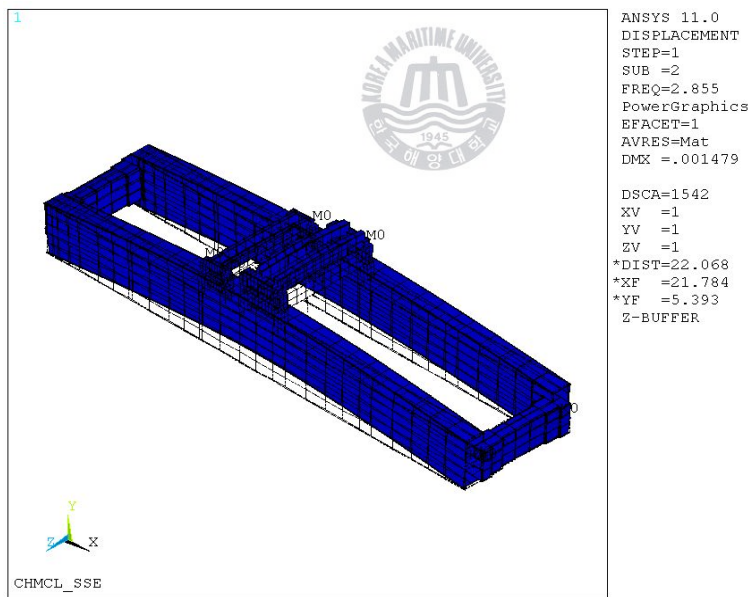


Fig. 20 2nd mode shape at 2.855 Hz for Case A

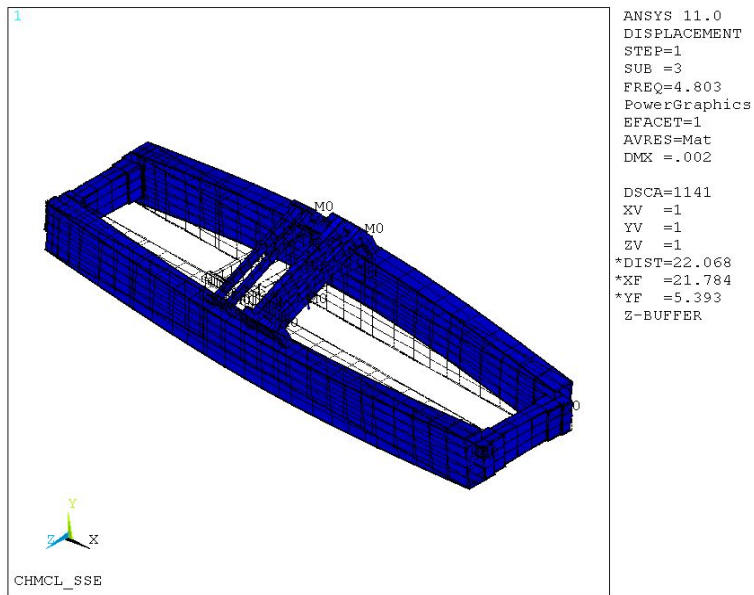


Fig. 21 3rd mode shape at 4.803 Hz for Case A

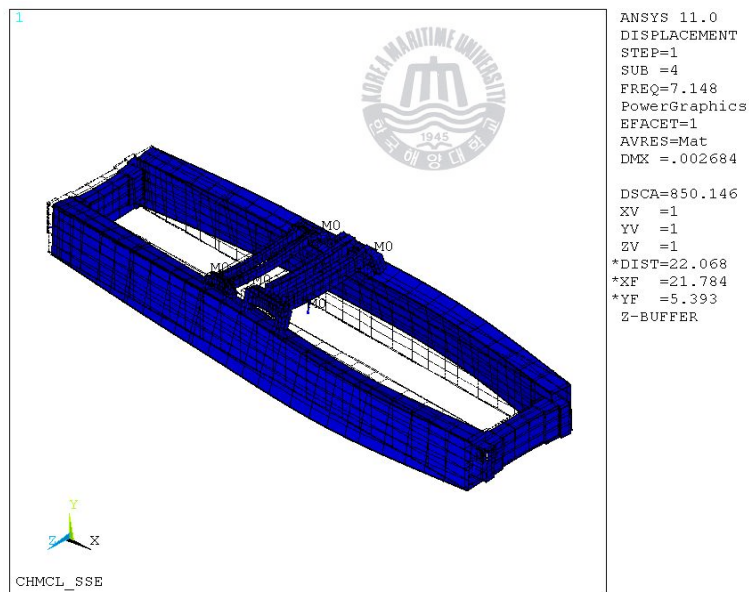


Fig. 22 4th mode shape at 7.148 Hz for Case A

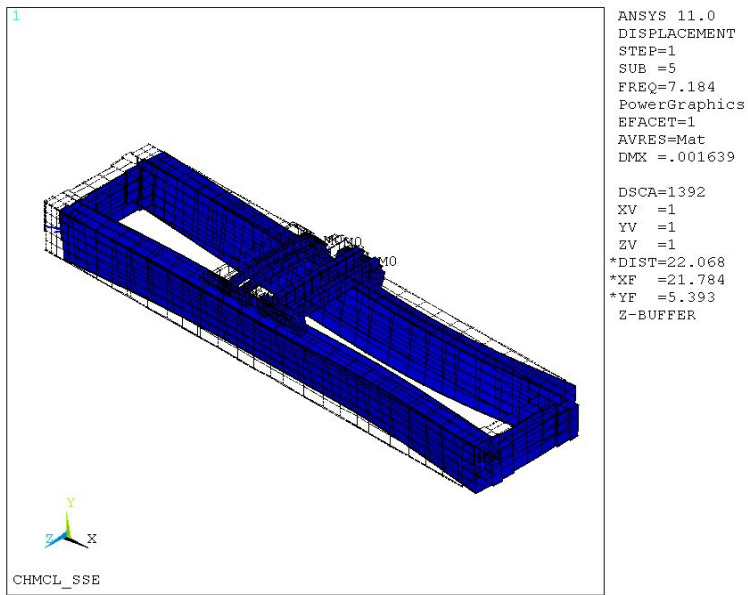


Fig. 23 5th mode shape at 7.184 Hz for Case A

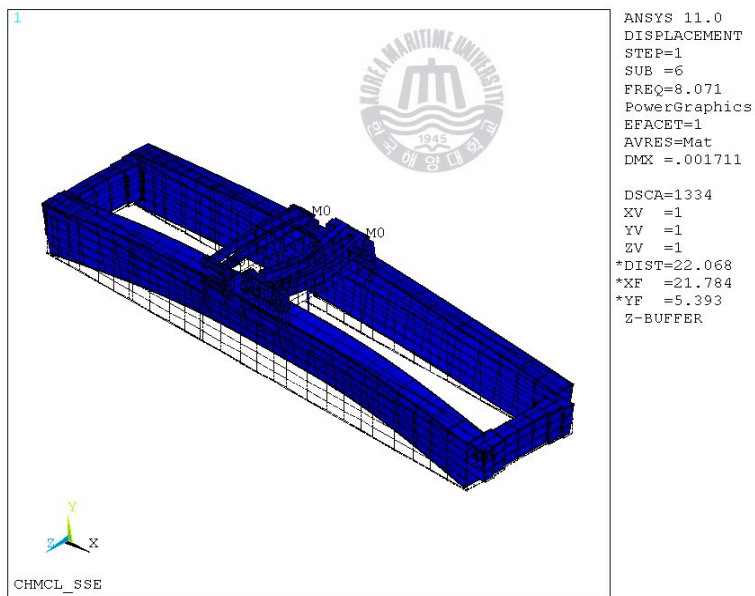


Fig. 24 6th mode shape at 8.071 Hz for Case A

Table 13 Modal frequencies for Case B

(unit : Hz)

Mode sequence number	Modal frequencies	Mode sequence number	Modal frequencies
1	1.7	26	31.0
2	2.6	27	31.8
3	4.6	28	33.5
4	4.9	29	35.0
5	7.2	30	36.9
6	7.2	31	37.2
7	8.6	32	37.4
8	10.2	33	39.6
9	10.3	34	40.6
10	11.0	35	41.3
11	16.2	36	42.1
12	16.4	37	42.8
13	17.1	38	43.5
14	18.1	39	44.9
15	20.4	40	46.1
16	21.4	41	46.6
17	21.8	42	48.7
18	24.7	43	49.8
19	25.9	44	50.0
20	26.7	45	50.5
21	26.9	46	52.2
22	27.6	47	54.1
23	28.6	48	55.7
24	29.5	49	56.4
25	30.2	50	58.7

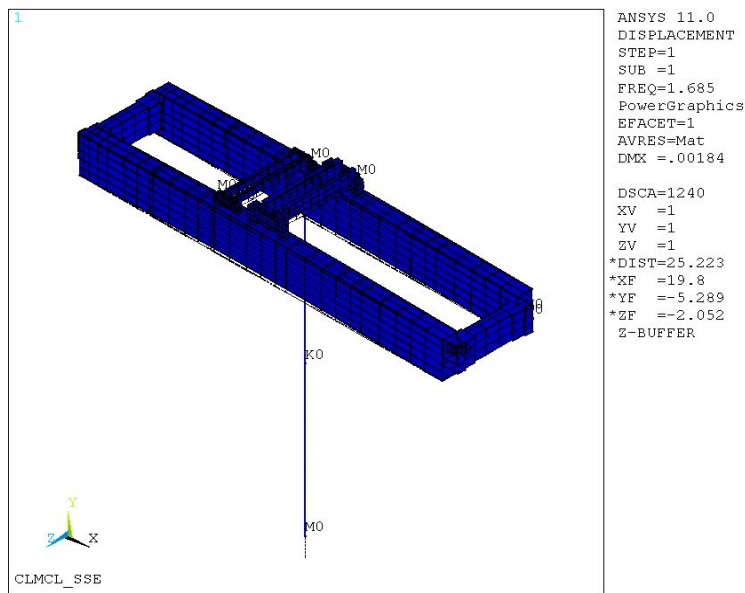


Fig. 25 1st mode shape at 1.685 Hz for Case B

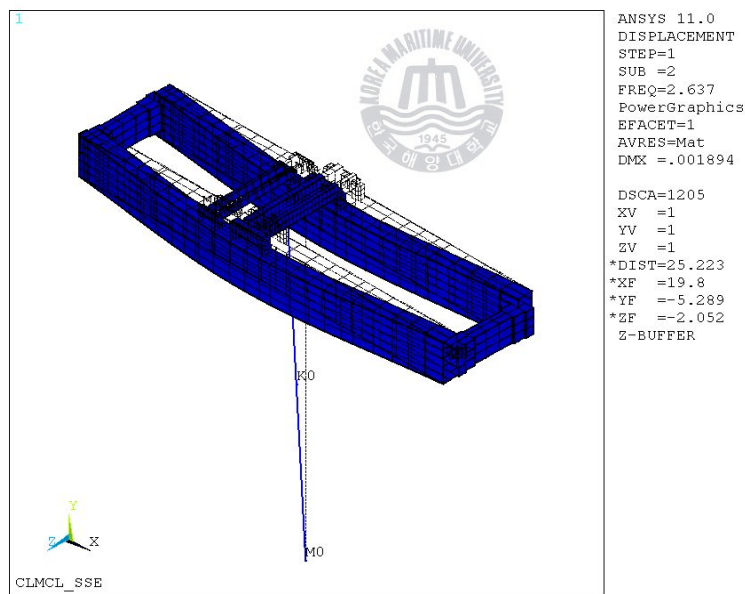


Fig. 26 2nd mode shape at 2.637 Hz for Case B

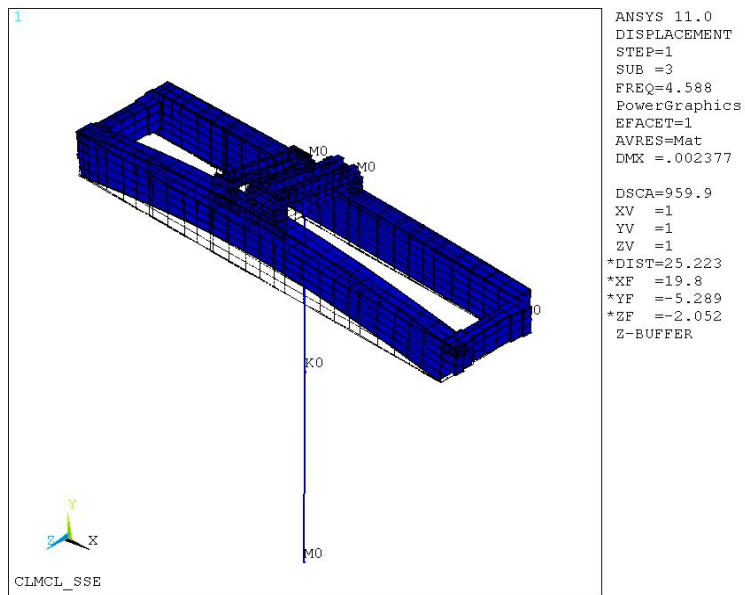


Fig. 27 3rd mode shape at 4.588 Hz for Case B

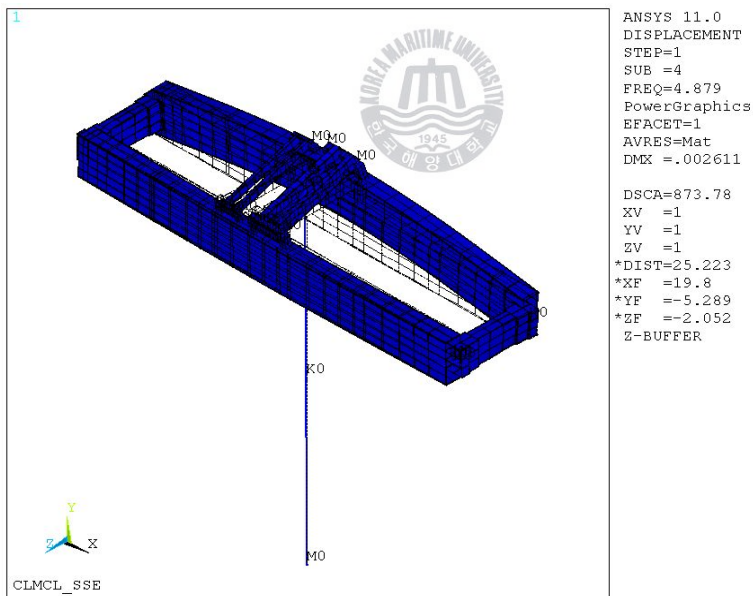


Fig. 28 4th mode shape at 4.879 Hz for Case B

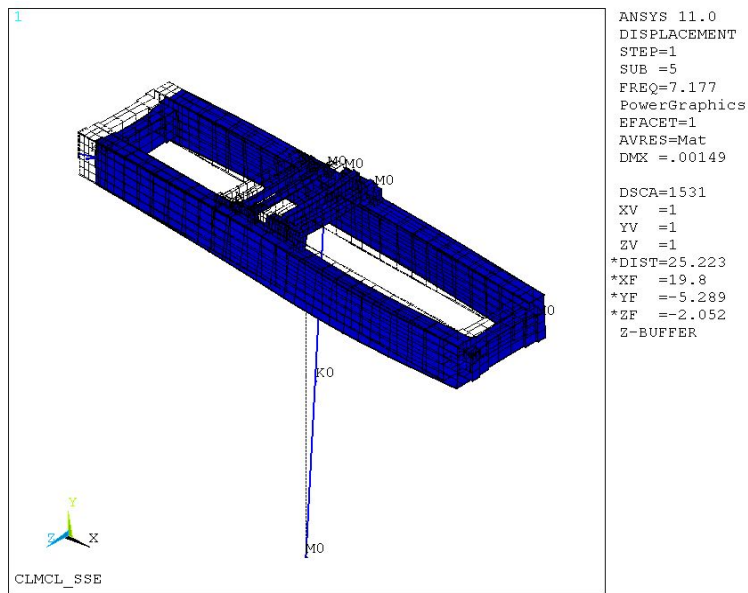


Fig. 29 5th mode shape at 7.177 Hz for Case B

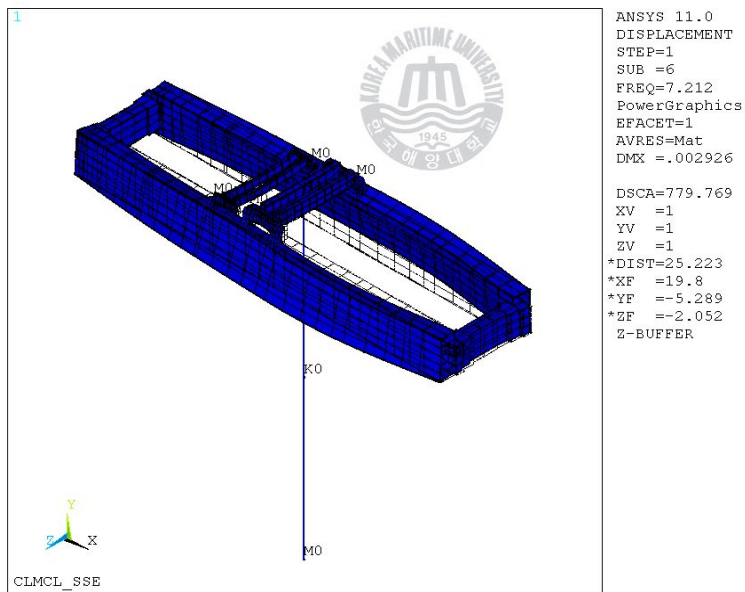


Fig. 30 6th mode shape at 7.212 Hz for Case B

Table 14 Modal frequencies for Case C

(unit : Hz)

Mode sequence number	Modal frequencies	Mode sequence number	Modal frequencies
1	2.6	26	31.3
2	4.2	27	32.2
3	4.8	28	35.0
4	7.2	29	36.9
5	7.2	30	37.2
6	8.6	31	37.4
7	10.2	32	39.1
8	10.3	33	39.7
9	11.0	34	40.7
10	16.1	35	41.3
11	16.3	36	42.1
12	17.1	37	42.9
13	18.1	38	43.7
14	20.1	39	44.9
15	20.6	40	46.2
16	21.8	41	46.8
17	24.2	42	48.7
18	24.7	43	49.8
19	26.0	44	50.0
20	26.7	45	50.5
21	27.5	46	52.2
22	28.6	47	54.1
23	29.5	48	55.7
24	30.0	49	56.4
25	30.9	50	58.7

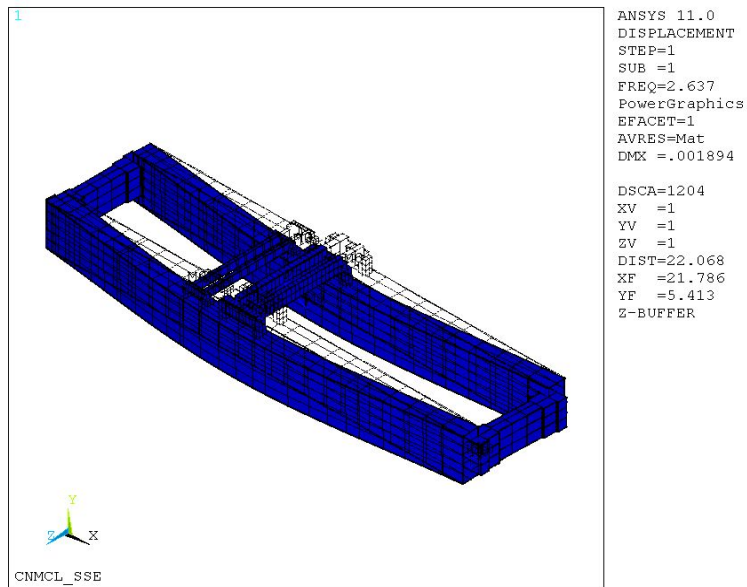


Fig. 31 1st mode shape at 2.637 Hz for Case C

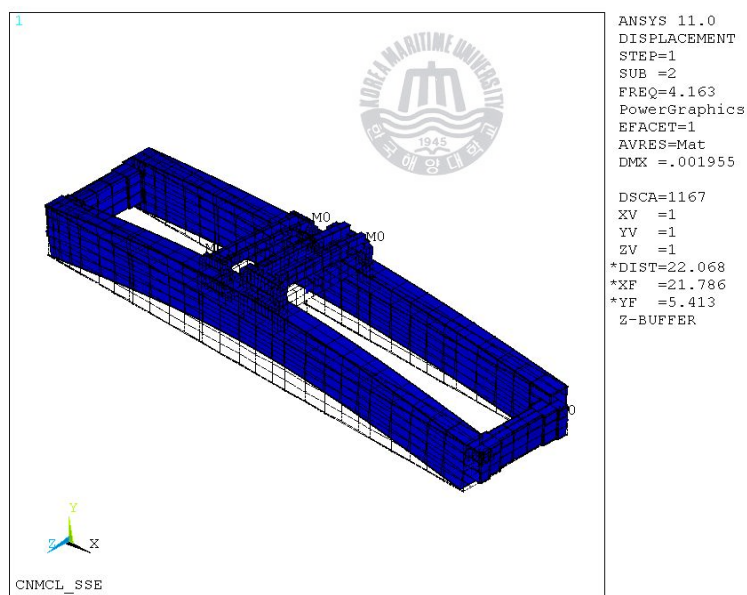


Fig. 32 2nd mode shape at 4.163 Hz for Case C

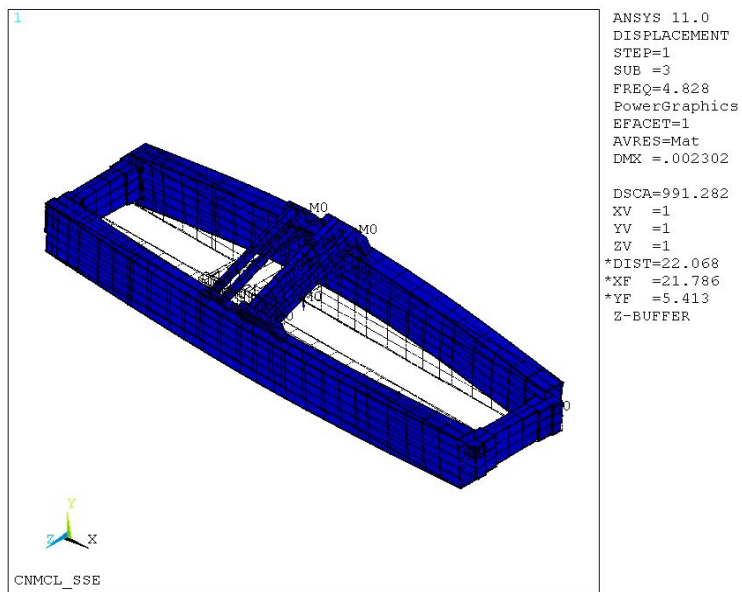


Fig. 33 3rd mode shape at 4.828 Hz for Case C

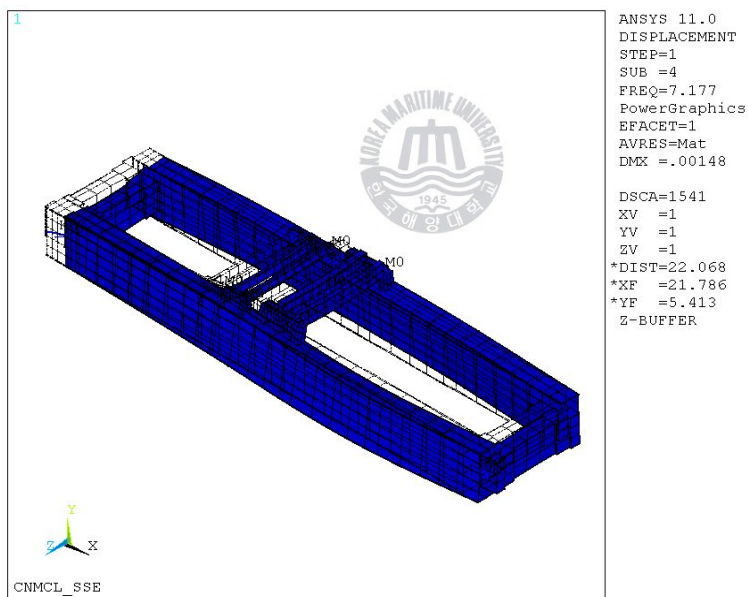


Fig. 34 4th mode shape at 7.177 Hz for Case C

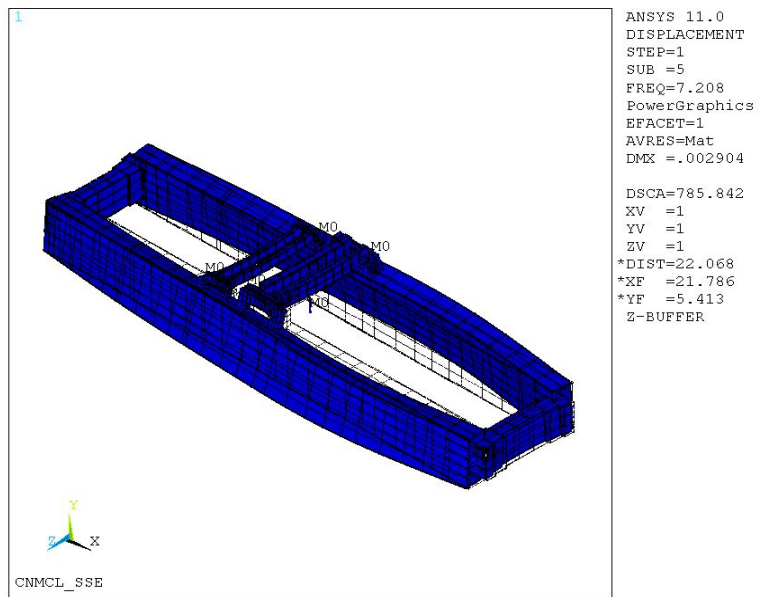


Fig. 35 5th mode shape at 7.208 Hz for Case C

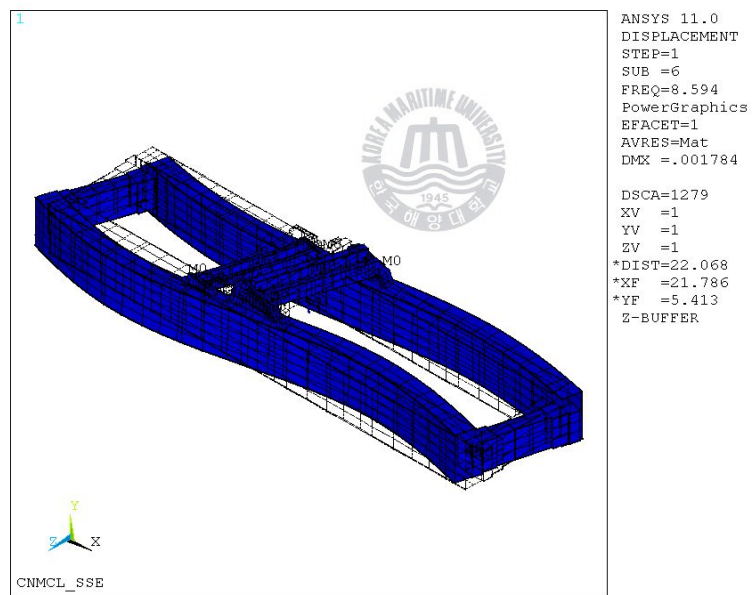


Fig. 36 6th mode shape at 8.594 Hz for Case C

4.3.2 유효질량 분석

유효질량의 평가는 내진 해석에 있어서 주어진 입력에 대한 구조물에 주요한 진동 모드를 분석하는 기준으로 사용되므로 폴라 크레인의 진동 모드에 대한 유효질량을 평가하고 분석하였다.

세 가지 Case가 유사한 고유진동수와 모드를 나타내므로 Case A에 대한 유효질량 분석만을 수행하였다. horizontal, vertical 방향의 유효질량을 Table 15 ~ 16에 정리하였고, 각 방향별 전체 질량에 대한 전체 유효질량의 비율을 Table 17에 정리하였다. Fig. 37~38에는 계산된 각 주파수별 horizontal, vertical 방향의 유효 질량의 크기를 그래프로 나타내었다.



Table 15 Effective mass in the horizontal-direction

(unit : kg)

Mode sequence number	Effect Mass	Mode sequence number	Effect Mass
1	7.3	26	0.0
2	0.2	27	80.9
3	11597.1	28	287.5
4	57960.5	29	0.2
5	161.9	30	15.5
6	483.0	31	25.6
7	12.6	32	0.6
8	4.5	33	0.2
9	14.4	34	2.0
10	22.6	35	0.7
11	316.0	36	0.6
12	3.4	37	2.5
13	41.8	38	0.1
14	6.6	39	0.1
15	10.4	40	0.0
16	66.2	41	0.0
17	38.5	42	0.4
18	4.9	43	0.6
19	0.1	44	0.1
20	0.2	45	0.0
21	0.7	46	0.0
22	0.2	47	0.0
23	0.0	48	0.2
24	0.1	49	0.2
25	0.0	50	0.5

Table 16 Effective mass in the vertical- direction

(unit : kg)

Mode sequence number	Effect Mass	Mode sequence number	Effect Mass
1	7.3	26	0.0
2	0.2	27	80.9
3	11597.1	28	287.5
4	57960.5	29	0.2
5	161.9	30	15.5
6	483.0	31	25.6
7	12.6	32	0.6
8	4.5	33	0.2
9	14.4	34	2.0
10	22.6	35	0.7
11	316.0	36	0.6
12	3.4	37	2.5
13	41.8	38	0.1
14	6.6	39	0.1
15	10.4	40	0.0
16	66.2	41	0.0
17	38.5	42	0.4
18	4.9	43	0.6
19	0.1	44	0.1
20	0.2	45	0.0
21	0.7	46	0.0
22	0.2	47	0.0
23	0.0	48	0.2
24	0.1	49	0.2
25	0.0	50	0.5

Table 17 Sum of effective masses

	Sum of effective masses (ton)	Ratio to total mass (%)
Horizontal-direction	698.129	97
Vertical-direction	984.426	98

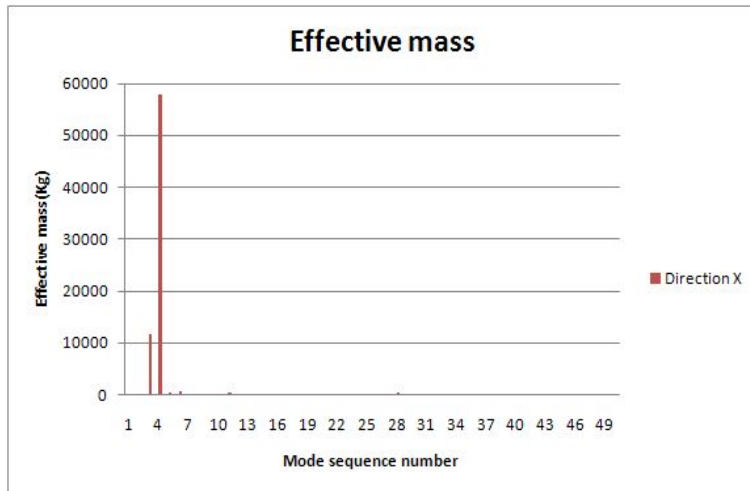


Fig. 37 Effective masses in horizontal direction

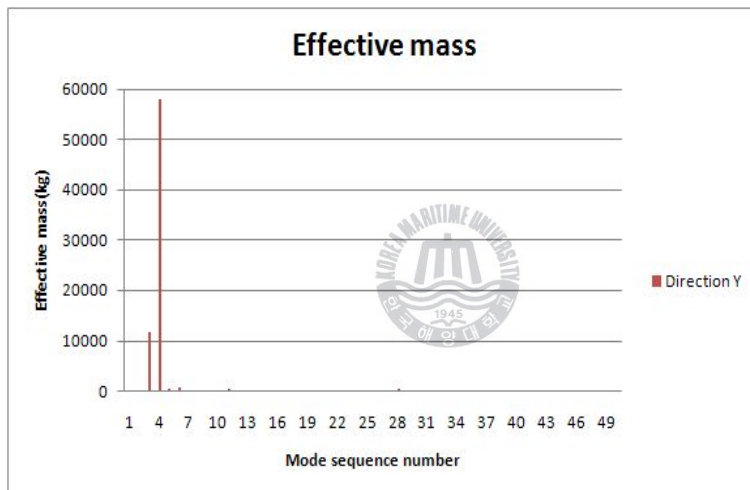


Fig. 38 Effective masses vertical direction

그래프를 통한 유효 질량을 분석해보면, horizontal방향은 4차 모드에서 가장 크고 vertical방향은 4차 모드에서 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 각 방향 별 영향을 볼 때 회전 방향을 나타내는 horizontal방향의 유효 질량의 합이 전체 질량의 97%와 상-하 방향인 vertical방향의 유효 질량은 합은 98%으로 두 방향에 모두 폴라 크레인에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4.4 응답 스펙트럼 해석

구조물에 대하여 내진설계를 할 경우에는 일반적으로 구조물의 최대응답을 기준으로 필요한 강도를 결정하므로 시간변화에 따른 구조물의 시간이력거동을 모두 필요로 하지는 않는다. 따라서 내진설계를 위하여 간편하고 쉬운 방법으로 구조물의 최대 지진응답을 알아낼 필요가 있으며 이러한 목적으로 흔히 사용되는 것이 응답스펙트럼(response spectrum)이다.

Biot와 Housner는 지진으로 인한 구조물의 영향을 나타내기 위하여 진동주기와 구조물의 최대응답과의 관계를 그래프로 나타낸 응답스펙트럼을 제안하였다. 이러한 응답스펙트럼을 사용하면 지진에 의한 지반운동에 관한 정확한 정보를 가지고 구조물에 대하여 복잡한 시간이력해석을 수행해야 하는 번거로움 없이 쉽게 구조물의 최대응답을 근사적으로 구할 수 있기 때문에 현재 구조물의 지진해석 및 내진설계에 널리 이용되고 있다.

4.4.1 응답 스펙트럼

설계용 응답스펙트럼(design response spectrum)은 구조물의 내진설계에서 지진의 영향을 고려하여 지진력을 산정하기 위하여 사용된다. 특정한 지반운동에 대하여 작성된 응답스펙트럼은 진동주기에 따라서 급격히 변하므로 들쭉날쭉한 형태를 가지고 있다. 그리고 여러 가지의 지반운동에 대한 응답 스펙트럼은 서로 다른 형태를 가지게 된다. 그러나 해당 부지에서 예상되는 지반운동은 정확하게 예측하는 것이 불가능하므로 이것으로부터 설계용 응답스펙트럼을 구하기도 어렵다. 미래에 발생할 지반운동에 대하여 정확한 응답스펙트럼을 예측하는 것이 불가능하다면 과거에 발생한 여러 가지의 지진에 의한 응답스펙트럼을 작성할 필요가 있다. 일반적으로 내진설계기준에서는 설계용 응답스펙트럼을 진동주기에 따라서 급격하게 변하지 않는 완만한 곡선으로 규정하고 있다.

지진에 의한 지반가속도의 시간이력을 사용하면 변위응답스펙트럼 뿐만 아니라 속도응답스펙트럼이나 가속도응답스펙트럼을 작성할 수 있다. 그러나 세 가지의 응답스펙트럼을 사용하면 여러 가지로 불편하므로 이것을 하나의 그래프로 표현하는 것이 바람직하다. 그래서 구조물의 응답이 조화함수로 표현될 수 있다고 가정하고 유사속도(pseudo velocity: V)와 유사가속도(pseudo acceleration: A)의 개념을 도입한다. 내진설계기준에서는 유사속도와 유사가속도를 이용하여 설계응답스펙트럼을 설정하는 방법을 채택하고 있다.

구조물에 발생하는 변위는 지반가속도와 구조물의 동적특성에 좌우되지만 만약 변위를 식 (4.1)과 같이 최대치가 u_o 인 조화운동으로 가정하며 이에 대한 속도 및 가속도는 식 (4.2)와 식 (4.3)에서 보는 바와 같이 조화함수로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = u_o \sin w_n t \quad (4.1)$$

$$\dot{u}(t) = u_o w_n \cos w_n t \quad (4.2)$$

$$\ddot{u}(t) = -u_o w_n^2 \sin w_n t \quad (4.3)$$

이 식으로부터 변위, 속도 및 가속도의 최대치는 u_o , \dot{u}_o , \ddot{u}_o 임을 알 수 있으며 이것들을 다음과 같이 각각 최대변위 D , 유사속도 V 및 유사가속도 A 로 정의하는데 유사속도 V 및 유사가속도 A 는 D 에 w_n 및 w_n^2 을 곱하여 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$D \equiv u_o \quad (4.4)$$

$$V \equiv \dot{u}_o = D w_n = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (4.5)$$

$$A \equiv \ddot{u}_o = D w_n^2 = \left(\frac{2\pi}{T_n} \right)^2 D \quad (4.6)$$

구조물에 저장되는 최대 변형에너지 (E_{so})는 최대 운동에너지와 같으므로 식 (4.7)의 마지막 항에 있는 유사속도 V 는 최대속도와 같음을 알 수 있다.

$$E_{so} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k(V/w_n)^2}{2} = \frac{mV^2}{2} \quad (4.7)$$

식 (4.8)에서 보는 바와 같이 최대밀면전단력(V_{bo}) 또는 최대등가적정하중 (f_{so})은 질량 m 과 유사가속도 A 의 곱으로 나타낼 수 있는데 구조기술자들이 질량보다는 무게에 친숙하므로 유사가속도를 중력가속도로 나눈 A/g 와 무게의 곱으로 표현하는 방법을 주로 사용한다.

$$V_{bo} = f_{so} = mA = A \frac{W}{g} = \frac{A}{g} W \quad (4.8)$$

여기서 A/g 는 내진설계기준에서 밀면전단력을 구하기 위하여 사용되는 밀면전단계수(base shear coefficient) 또는 횡하중계수(lateral force coefficient)이다. 우리나라의 내진설계기준에서는 밀면전단력을 식 (4.9)와 같이 규정하고 있는데 이것은 밀면전단계수의 형태를 이용하여 전체 무게에 비례하는 밀면전단력을 규정하고 있음을 알 수 있다.

$$V_{bo} = C_s W \quad (4.9)$$

그러나 식 (4.1)와 같은 조화함수와 지진에 의한 구조물의 변위는 어느 정도 차이가 나게 되는 경우가 많다. 그러므로 변위를 시간에 대해서 미분하여 얻게 되는 속도와 가속도는 식 (4.2) 및 식 (4.3)과 어느 정도 차이가 날 수 있다.

그러나 많은 경우에는 진동주기가 매우 길지 않은 경우에는 유사속도 및 유사가속도와 최대속도 및 최대가속도가 큰 차이를 보이지 않는 경향이 있다. 그러므로 최대속도와 최대가속도를 사용하기 보다는 유사속도와 유사가속도를 사용하면 내진설계에 관한 연구에 여러 가지로 편리하므로 유사속도 및 유사가속도를 흔히 사용하고 있다.

본 연구에 사용된 응답스펙트럼 값은 Table 18 ~ 19와 Fig. 39 ~ 40에 North-South, Vertical 방향에 대하여 각각 나타내었다. SSE조건에 사용된 응답 스펙트럼은 3%의 감쇠비를 적용하였다.



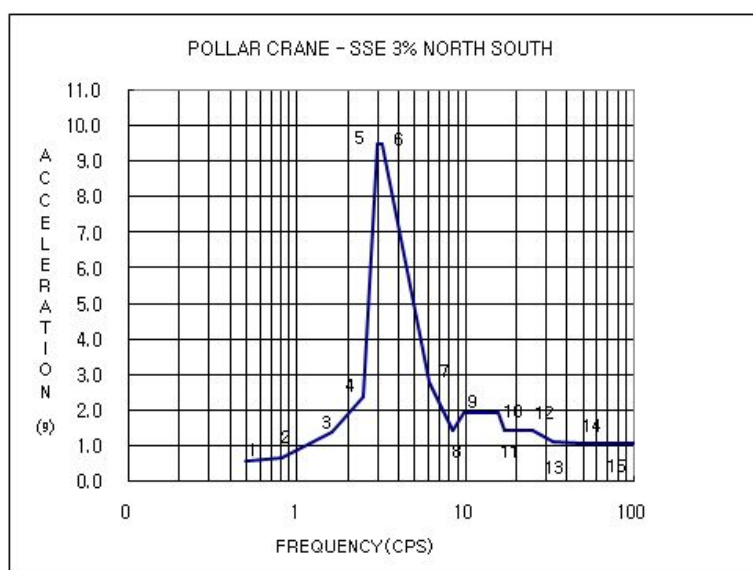


Fig. 39 North-South direction reference response spectra

Table 18 North-South direction reference response spectra

No.	Reference Response Spectra (Global Horizontal)	
	Frequency (Hz)	Acceleration (g)
1	0.50	0.60
2	0.82	0.65
3	1.60	1.40
4	2.45	2.40
5	2.98	9.50
6	3.20	9.50
7	6.02	2.80
8	8.35	1.45
9	9.67	1.95
10	15.50	1.95
11	17.00	1.45
12	25.00	1.45
13	33.30	1.10
14	50.00	1.08
15	100.00	1.08

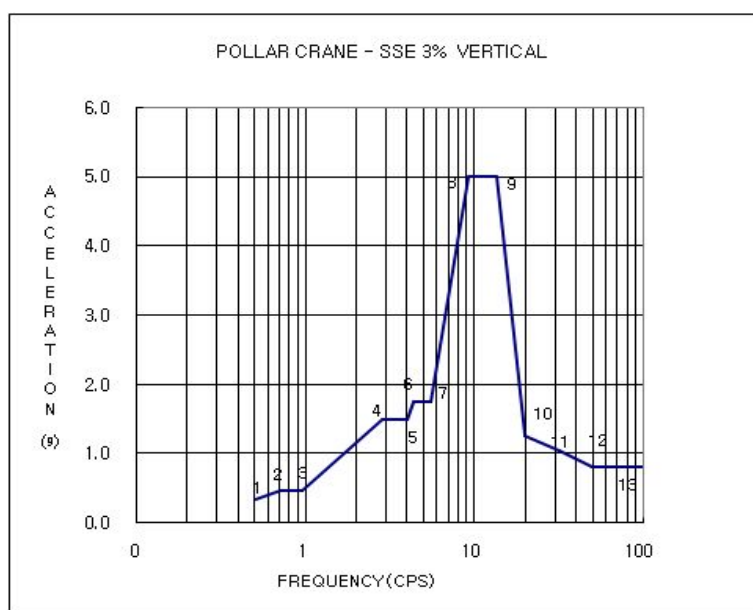


Fig. 40 Vertical direction reference response spectra

Table 19 Vertical direction reference response spectra

No.	Reference Response Spectra (Global Vertical)	
	Frequency (Hz)	Acceleration (g)
1	0.50	0.34
2	0.70	0.46
3	0.95	0.46
4	2.82	1.50
5	3.98	1.50
6	4.32	1.75
7	5.50	1.75
8	9.30	5.00
9	13.40	5.00
10	20.00	1.25
11	31.60	1.05
12	50.00	0.80
13	100.00	0.80

4.4.2 스펙트럼 해석 결과 분석

앞에서 제시한 3%의 감쇠비 응답 스펙트럼을 이용하여 SSE 조건에 대한 응답 스펙트럼 해석을 수행하였다. 계산된 SSE 조건에서의 각 Case에 대한 von Mises 응력 분포를 Fig. 41 ~ 46에 나타내었으며, 최대 응력값은 Table 20에 나타내었다. 또한 각 Case에 대한 변위 분포를 Fig. 47 ~ 49에 나타내었으며, 주요 component에서의 최대 변위값을 Table 21에 정리하였다. 최대 응력값은 Case A가 가장 크게 나타났으며, 변위 분포는 Case B가 가장 크게 나타나고 있으나 Case B의 경우는 로프의 변위가 상대적으로 브릿지 변위보다 크게 나타나게 되게 되었고 실질적으로 Case A의 경우가 브릿지에서 최대 변위가 나타난 것을 알 수 있다. 이를 최대응력과 변위는 허용응력과 허용변위보다 낮은 값을 나타내고 있고 폴라크레인의 건전성을 확인하였다.

Table 20 Maximum stress

(unit : MPa)

		Case A	Case B	Case C
Maximum von Mises stress	Bridge	96	67	72
	Trolley	137	74	72

Table 21 Maximum displacement

(unit : mm)

Appendix title	Max. Vertical Girder Deflection					
	Member number	Normal	Longi +vert-SSE	Lateral SSE	Resultant SSE	Normal +SSE
Case A	44	28.3	41.0	0.9	41.8	70.1
Case B	44	28.3	28.6	0.9	29.4	57.7
Case C	44	17.2	31.1	0.9	31.9	49.1

Appendix title	Max. Lateral Girder Deflection					
	Member number	Normal	Longi +vert-SSE	Lateral SSE	Resultant SSE	Normal +SSE
Case A	44	1	11.8	19.2	31.0	32.0
Case B	44	1	6.9	19.2	26.0	27.0
Case C	44	0.2	7.3	19.2	26.4	26.6

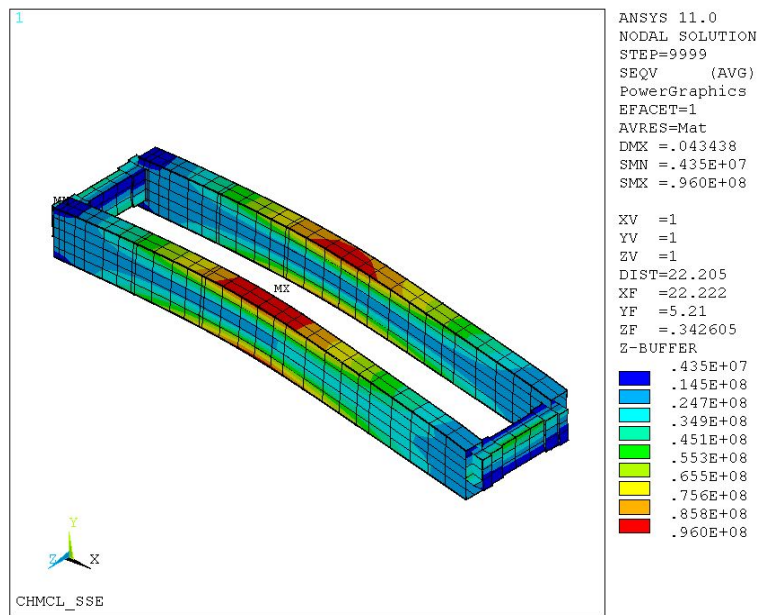


Fig. 41 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A in bridge

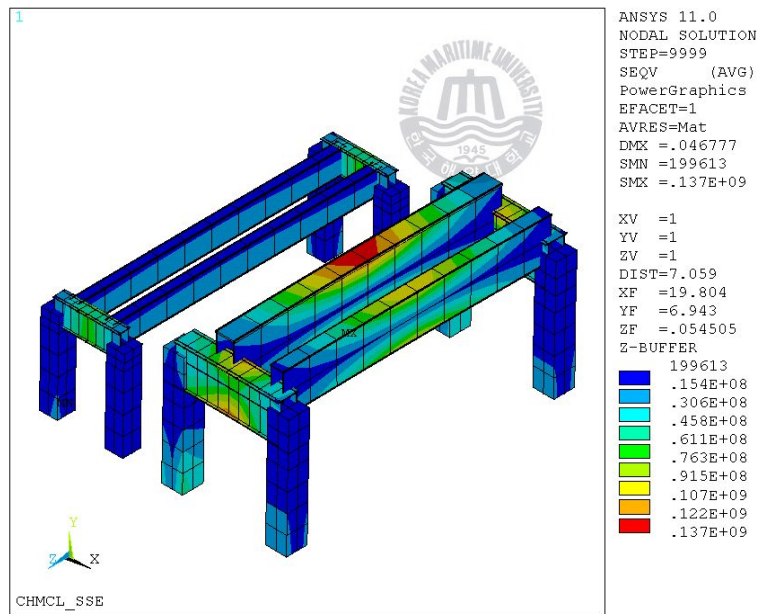


Fig. 42 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A in trolley

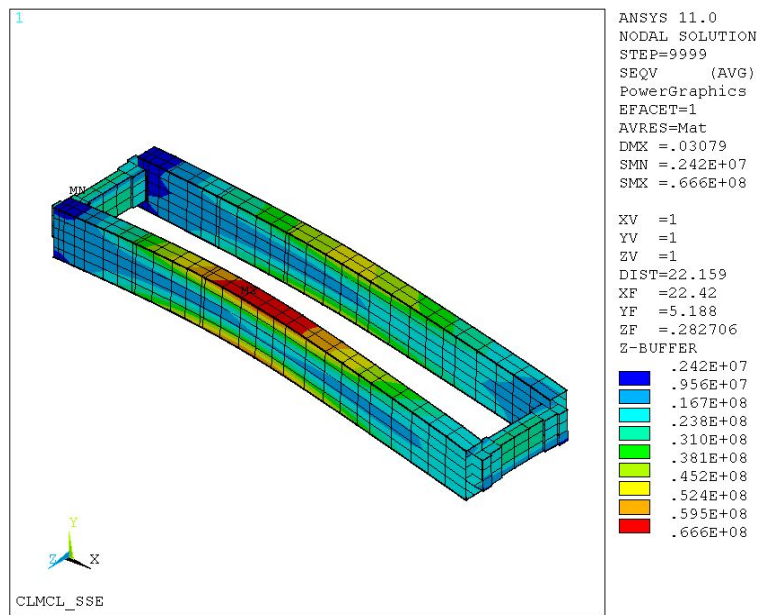


Fig. 43 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B in bridge

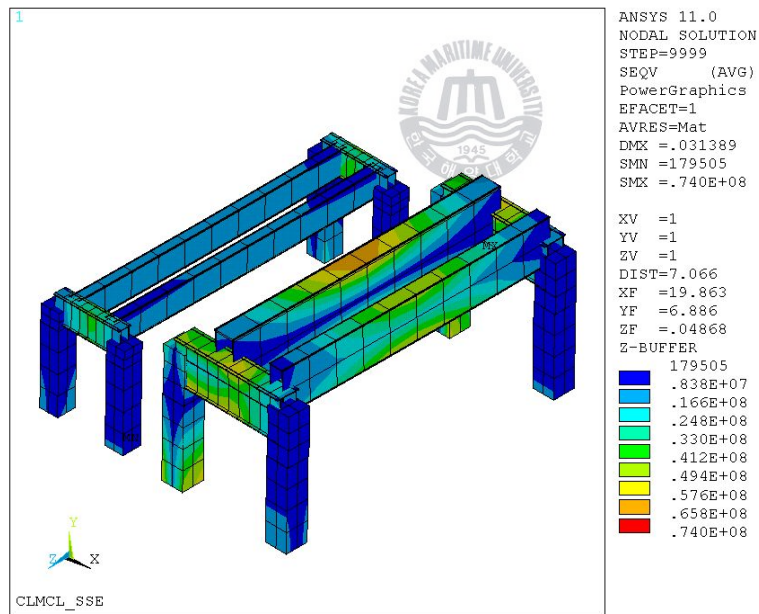


Fig. 44 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B in trolley

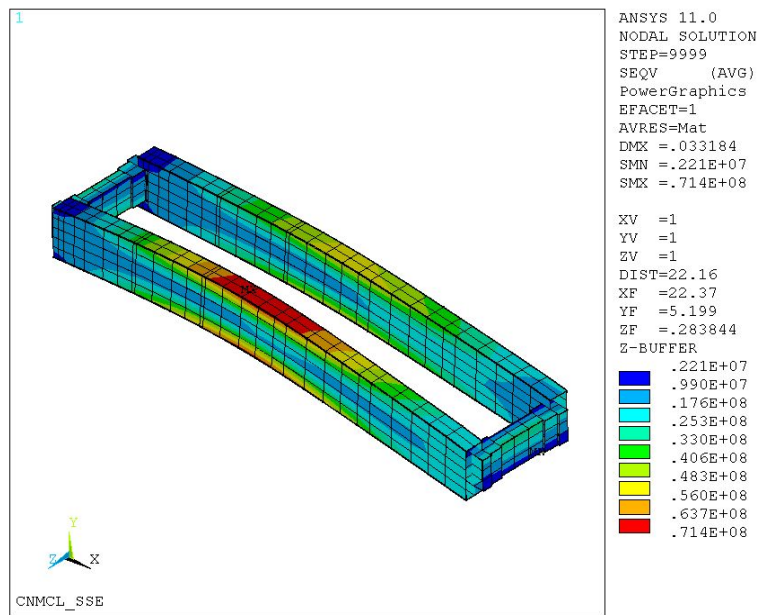


Fig. 45 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case C in bridge

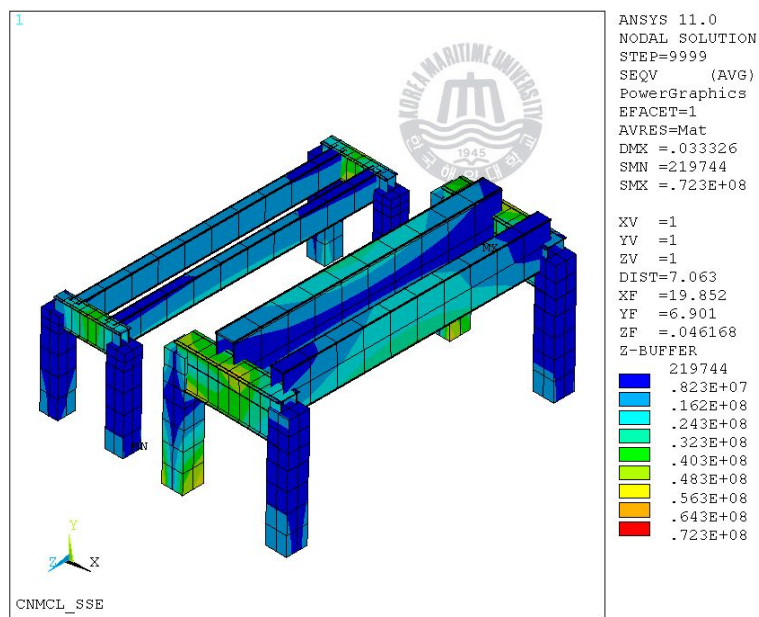


Fig. 46 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case C in trolley

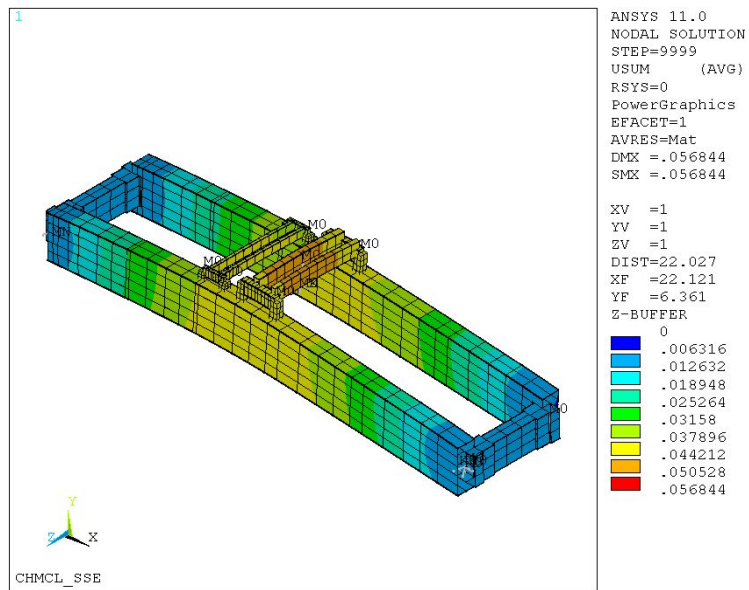


Fig. 47 Distribution of displacement on SSE condition for Case A

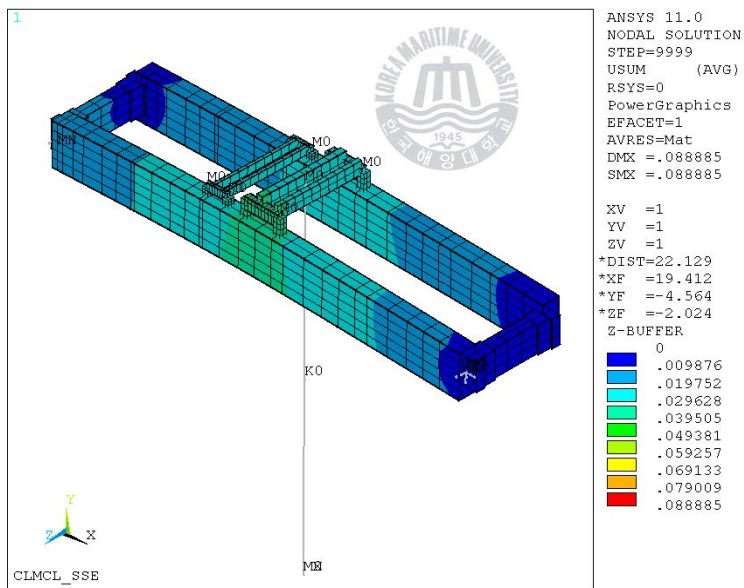


Fig. 48 Distribution of displacement on SSE condition for Case B

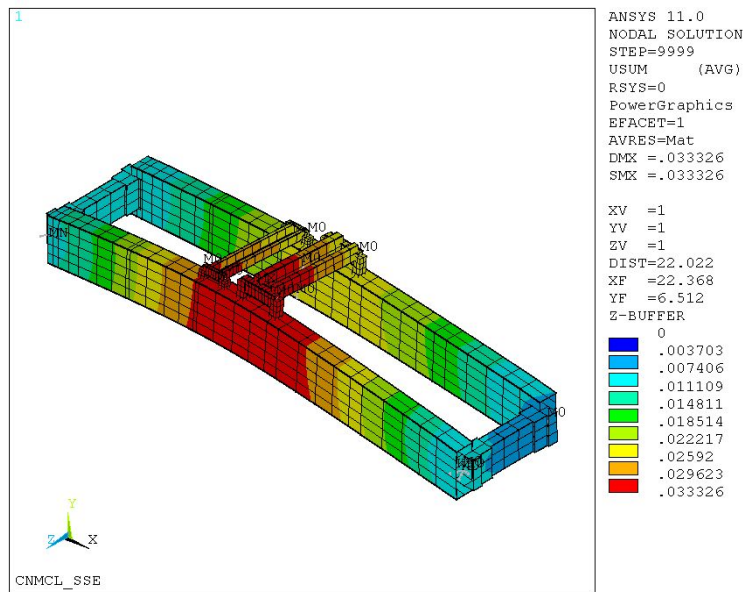


Fig. 49 Distribution of displacement on SSE condition for Case C



5. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 폴라 크레인의 설계를 위해 유한요소법을 통해 고정하중과 활하중을 고려한 운전조건과 안전정지지진 하중을 고려한 SSE 조건에 대한 내진해석을 수행하였다. 고유치 해석을 통하여 폴라 크레인의 고유진동수와 진동형상을 파악하고 응답 스펙트럼 해석을 통해 폴라 크레인의 내진 안전성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폴라 크레인의 내진 설계에 관한 절차와 해석 방법을 확립하였으며 원자력 발전소의 폴라 크레인의 최적화 설계를 하였다.
2. 서포트의 강성에 따라 스펙트럼 해석의 반력 값이 매우 크게 차이가 나타나고 있음을 확인하였으며 서포트의 강성을 높임으로써 반력을 최소화 할수 있는 방법을 제시하였다.
3. 총 50 모드의 고유치 해석을 수행한 결과, 유효질량이 90% 이상 반영되었으며, 폴라 크레인의 내진 해석 결과 허용 응력을 만족하는 것을 확인할 수 있다.
4. 내진해석에 필요한 구조 모델링과 유한요소해석은 상용코드인 ANSYS를 활용하여 해석의 과정과 해설 결과를 이용한 상세설계 과정을 표준화하여 설계프로젝트에 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] 손영호, “한반도 지진 특성을 고려한 국도상 교량의 내진 설계”, 論文集-慶北專門大學, Vol.18 No.1, 2000.
- [2] 윤광섭, “예측불허 하중에 대비한 내진·면진·제진 설계 및 시공”, 면진·제진 설계지침(안) 공청회 참가 보고, 2007.
- [3] 원자력발전소 안전계통 캐비닛의 내진 설계를 위한 동적 해석, 조정래, 계명대학교 기계공학과 석사학위논문, 2005.
- [4] ASME CODE SECT. II PART D, 2007 Edition.
- [5] 이용일, “원전구조물의 내진해석 및 설계”, 전산구조공학회, 1995
- [6] 전효중 외, “기계역학”, 효성출판사, 1999
- [7] 내진설계를 위한 구조동역학, 이동근, 조소훈, 한국지진공학회, 구미서관, 2007.
- [8] Anik K. Chopra, Dynamics of structures, 피어슨에듀케이션코리아, 2005
- [9] ANSYS Finite Element Computer Code & Manual.
- [10] Smithells Metal Reference Book, 8th Ed., W.F. GALE & T.C. TOTMEMIER, 2004, ASM.
- [11] 윤정방 외, “구조물의 내진설계”, 제 15회 전산구조공학회 기술강습회, 한국 전산구조공학회, 1997. 1. 20 - 1. 22.
- [12] 최명수 외, “강성계수의 전달을 이용한 골조구조물의 정적해석”, 한국전산구조공학회 논문집 제 16권 제1호, 2003.
- [13] 윤정방 외, “지반-구조물 상호작용계의 강성계수 추정 및 비선형지진해석” 한국지진공학회 논문집, 제1권 제1호, 1997